ENLEVEMENT DES SEDIMENTS - GUIDE METHODOLOGIQUE -



Evaluation Détaillée des Risques liés à la gestion des sédiments et aux opérations de curage

* santé humaine



- EDR SEDIMENTS -

Ce guide a été financé par :

- l'Agence de l'Eau Artois-Picardie,
- la Direction Régionale de l'Environnement du Nord Pas de Calais (DIREN)
- le Conseil Régional l'Environnement du Nord Pas de Calais

Il a été réalisé par le Groupe de Travail Opérationnel de la Thématique Sédiments Pollués du Pôle de Compétence Sites et Sols Pollués.

La réalisation du guide a été confiée aux bureaux d'études :

URS France

Sandrine MAGDALINIUK
Céline PISANO
Maxence VERMERSCH
87, avenue François Arago
92017 NANTERRE CEDEX
Tél: 01 55 69 20 00

Fax: 01 55 69 20 01 Mél: sandrine_magdaliniuk@urscorp.com

OPHRYS

Thierry IMBERT Vianney ALLARD 299, rue Saint Sulpice 59500 DOUAI

Tél: 03 27 93 45 64 Fax: 03 27 93 45 01 Mél: ophrys@wanadoo.fr

Crédit photo : OPHRYS

La réalisation du guide a été suivie régulièrement par un groupe de travail composé de :

BECART David	Voies Navigables de France	david.becart@vnf.fr
BERTRAND Marcel	D.R.A.F Nord Pas de Calais	marcel.bertrand@agriculture.go
		uv.fr
BOGUSZ Daniel	Agence de l'Eau Artois-Picardie	d.bogusz@eau-artois-picardie.fr
CHARRIER Christophe	Centre d'Etudes Techniques	christophe.charrier@cetmef.equ
	Maritimes Et Fluviales	ipement.gouv.fr
DELAUNAY Alexis	Ministère de l'Aménagement du	alexis.delaunay@environnemen
	Territoire et de l'Environnement	t.gouv.fr
DESPEYROUX Yves	Conseil Régional Nord - Pas de	y.despeyroux@cr-npdc.fr
	Calais	
GOLASZEWSKI	Ministère de l'Aménagement du	genevieve.golaszewski@enviro
Geneviève	Territoire et de l'Environnement	nnement.gouv.fr
PEBAY Pierre	Lille Métropole Communauté	ppebay@cudl-lille.fr
	Urbaine	
SIX Pierre	Chambre d'Agriculture du Nord	chambagri.cda-59@nordnet.fr
THOMAS Christophe	DIREN Nord-Pas de Calais	sema.diren@nord-pas-de-
		calais.environnement.gouv.fr
VERHAEGHE Hubert	Agence de l'Eau Artois-Picardie	h.verhaeghe@eau-artois-
		picardie.fr
VIVANT Didier	Service navigation Nord - Pas	didier.vivant@equipement.gouv
	de Calais	.fr

Les remarques des membres du Comité National sur la Gestion des Sédiments ont permis de judicieux ajustements dans l'élaboration de ce guide.

Organisme	Nom	e-mail
ADEME	FEIX Isabelle	
ADEME	MILITON Christian	
ADEME	PHILIPPE Patrice	
ADEME	PRUDHOMME Eric	
Agence de l'eau Artois Picardie	BOGUSZ Daniel	d.bogusz@eau-artois-picardie.fr
Agence de l'eau Artois Picardie	VERHAEGHE Hubert	h.verhaeghe@eau-artois-picardie.fr
Agence de l'eau Rhin Meuse	RIOU Claire	riou@Eau-Rhin-Meuse.fr
Agence de l'eau Rhin Meuse	WEINGERTNER Patrick	WEINGERTNER@Eau-Rhin-Meuse.fr
AGHTM / CTIA Suez-Lyonnaise des eaux	LUCAS Emmanuelle	Emmanuelle-LUCAS@mail.suez-lyonnaise-eaux.fr
Alsace Nature		alsace.nature@wanadoo.fr
APCA	PICOU Paul	
Association des Ingénieurs des Villes de	PEBAY Pierre	ppebay@cudl-lille.fr
France		
Lille Métropole Communauté Urbaine		
Association des Maires de France	DUPARAY Guillaume	gduparat@amf.asso.fr
BRGM	CLOZEL-LELOUP Blandine	b.clozel@brgm.fr
BRGM	DARMENDRAIL Dominique	d.darmendrail@brgm.fr
Cellulle qualité littoral - Bouches du	BERTRANDY Mary-Christine	cqel_13 <sm13.cqel@wanadoo.fr< td=""></sm13.cqel@wanadoo.fr<>
Rhône		
CEMAGREF	BABUT Marc	marc.babut@cemagref.fr
CERTU	THOMAZEAU	
CETMEF (centre d'études techniques	CHARRIER Christophe	Christophe.Charrier@cetmef.equipement.gouv.fr
maritimes et fluviales)		
Chambre d'Agriculture du Nord	SIX Pierre	chambagri.cda-59@nordnet.fr
Compagnie Nationale de Rhône	TERRIER Christian	c.terrier@cnr.tm.fr
Compagnie Nationale de Rhône / Dir	ZYLBERBLAT Marc	
exploitation		
Confédération paysanne	TERREAUX Jean-Damien	
Conseil général des ponts et chaussées	RENOUX Jean Paul	Language AVIDON Constitution of the second const
Conseil général du génie rural, des eaux	AVIRON VIOLET Jacques	Jacques.AVIRON-@agriculture.gouv.fr
et des forêts	MONTANE	
Conseil général du génie rural, des eaux	MONTANE Jean	
et des forêts	\/ADDET I	Joan Maria VADDET@agricultura gaus fr
Conseil général du génie rural, des eaux	VARRET Jean	Jean-Marie.VARRET@agriculture.gouv.fr
et des forêts	DEODEWDOLLWW	y.despeyroux@cr-npdc.fr
Conseil régional Nord Pas de Calais –	DESPEYROUX Yves	y.despeyroux@ci-ripac.ii
DEED	CAVOLLEranaia	francis.gayou@csp.environnement.gouv.fr
CSP	GAYOU Francis	mancis.gayou@csp.environnement.gouv.ii
CSP DD Mantaellier	ROUSSEAU Bernard	
CSP- DR Montpellier	PANTAROTTO	
DDAFF(groupement)	MONNOT Jean-Guy	
DDE (réseau)	BELOTTE J. Yves	
DIREN (collège)	SENEGAS Philippe	
DIREN Alsace DIREN Nord Pas de Calais	GOBILLON Yves	sema.diren@nord-pas-de-calais.environnement.gouv.fr
	THOMAS Christophe	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,
DIREN-SEMA BOURGOGNE	THOMASSEY André	sema@bourgogne.environnement.gouv.fr
DRAF Nord Pas de Calais	BERTRAND Marcel	Marcel.BERTRAND@agriculture.gouv.fr
DRIRE Rhône-Alpes / BETCGB	COTTIN Loic	loic.cottin@industrie.gouv.fr

joseph.eon@edfgdf.fr **EDF- Production Transport Mission EON Joseph** Hydraulique Gisele.Merle@edf.gdf.fr **EDF- Production Transport Mission** MERLE Gisèle Hydraulique **EDF- Production Transport Mission** albert.tondu@edfgdf.fr **TONDU Albert** Hydraulique Fédération Française de l'Aquaculture BAUER Hélène Fédération Française de l'Aquaculture LE COAT Robert propriétéagricole.fr Fédération Nationale de la Propriété **RONSSIN Bruno** Agricole (FNPA) **FNSEA** CONAN Hélène helene.conan@fnsea.fr **FNSEA** POMMARET Eugénia fneh2o@aol.com France Nature Environnement **NICOLAY Thomas** fneh2o@aol.com France Nature Environnement **PASQUIER Vincent** fneparis@aol.com France Nature Environnement réseau **BOUSQUET Pierre** fneh2o@aol.com **ROUSSEAU Bernard** France Nature Environnement réseau eau **ALZIEU Claude** Calzieu@ifremer.fr **IFREMER** IFREMER direction de l'environnement marie-helene.lamy@ineris.fr LAMY Marie-Hélène **INERIS** eric.thybaud@ineris.fr **INERIS THYBAUD Eric** Martine.Terce@paris.inra.fr **INRA TERCE Martine** Véronique.Ruban@Icpc.fr LCPC (laboratoire central des ponts et **RUBAN Véronique** chaussées) moilleron@univ-paris12.fr LEREVE-UPVM MOILLERON Régis **WISSOCQ Florence** Lille Métropole Communauté Urbaine (Pôle de compétences NPC) Min. Aménagement Territoire CASAL François Environnement / Direction Eau alexis.delaunay@environnement.gouv.fr **DELAUNAY Alexis** Min. Aménagement Territoire Environnement / Direction Eau genevieve.golaszewski@environnement.gouv.fr Min. Aménagement Territoire GOLASZEWSKI Geneviève Environnement / Direction Eau daniel.robbe@environnement.gouv.fr Min. Aménagement Territoire **ROBBE Daniel** Environnement / Direction Eau Min. Aménagement Territoire Catherine.bastien-ventura@environnement.gouv.fr **BASTIEN-VENTURA** Environnement/DGAD/SRAE Catherine michel.robert@environnement.gouv.fr Min. Aménagement Territoire **ROBERT Michel** Environnement/DGAD/SRAE frederic.leray@environnement.gouv.fr Min. Aménagement Territoire LERAY Frédéric Environnement/DPPR/SDPD christian.beau@environnement.gouv.fr Min. Aménagement Territoire **BEAU Christian** Environnement/DPPR/SEI Ministère de l'Agriculture et de la gerard.levast@agriculture.gouv.fr LEVAST Gérard Pêche/DERF Ministère de l'Agriculture et de la VAN EFFENTERE Pêche/DERF Ministère de l'Agriculture et de la MORIN G.A. Pêche/DERF/SDAFHA de la BOURDONNAY Armel armel.la-bourdonnaye@industrie.gouv.fr Ministère de l'économie des finances et de l'industrie/DIGEC/DGEMP/STEEGB Ministère de l'emploi et de la **ARNAUD Christine**

solidarité/DGS

Ministère de l'équipement, des transports GRESSIER Claude

et du logement/DTMPM

Ministère de l'équipement, des transports COUSIN François François.Cousin@equipement.gouv.fr

et du logement/DTT/SDTVN

Ministère de l'équipement, des transports DIVRY Alain

et du logement/DTT/SDTVN

MISE (mission d'inspection spécialisée GRIMOT Marc

de l'environnement)

Nord Nature RAMON

Port autonome de Paris

GUERIN Bernard

Mde@paris-ports.fr

VALTAT Paul Vincent

mde@paris-ports.fr

Port autonome de Paris / serv. navigation MORIN Yves

Seine

Port autonome de Paris / serv. navigation SCIOT Myriam

Seine

Service Navigation NPC VIVANT Didier

Service Navigation Strasbourg DARLEY Laurent SNS.AF.EE@WANADOO.fr

Service Navigation Strasbourg GERLINGER Martial Syndicat intercommunal de la Marque DEFFONTAINE TRAMAF (syndicat des travaux maritimes MEDIO Jean Marc

et fluviaux)

TRAMAF (syndicat des travaux maritimes PERRIOT-LOPEZ Isabelle obrule.emcc@campenon.com

et fluviaux)

TRAMAF (syndicat des travaux maritimes ROUDIER Jean-Philippe jproudier.emcc@campenon-sge.fr

et fluviaux)

VNF DAVID Michel

VNF-service environnement BECART David direction-infrastructure-environnement@vnf.fr

BERTAL Marie-Line

MEURANT-BAHAUT Arielle pascan@normandnet.fr

TABLE DES MATIERES

TΑ	BLE DES MATIERES	6
1.	INTRODUCTION GÉNÉRALE DU GUIDE	9
	METHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES RISQUES SANITAIRES APPLIQUÉ LA GESTION DES SÉDIMENTS D'ORIGINE CONTINENTALE	
	2.1. Méthode pour l'établissement d'un schéma conceptuel - Définition des	
	termes	
	2.1.1. Schéma conceptuel initial	
	2.1.2.Terme source	
	2.1.4. Terme transfert	
	2.1.5. Etablissement du schéma conceptuel final retenu pour évaluer les risques à la gestion des sédiments	liés
	2.2. Caractérisation de l'exposition aux sédiments	. 30
	2.2.1. Evaluation des concentrations d'exposition	30
	2.2.2.Evaluation des doses d'exposition	32
	2.3. Caractérisation et estimation du risque	. 34
	2.3.1. Caractérisation du risque pour les ressources en eau	34
	2.3.2. Caractérisation du risque pour la santé humaine	
	2.4. Analyse des incertitudes et validité des études	. 37
	2.5. Analyse de sensibilité	. 39
3.	GESTION DES RISQUES	. 40
4.	APPLICATION AUX SITUATIONS	. 43
	4.1. Situation 1 : Sédiments en place	. 44
	4.1.1. Caractérisation des sédiments	44
	4.1.2. Identification et caractérisation des cibles	
	4.1.3. Identification des voies de transfert	46
	4.1.4. Schéma conceptuel pour les sédiments en place	41 47
	·	
	4.2. Situation 2 : Le curage et le transport des sédiments curés	
	de curage et de transport	
	4.2.2. Identification des cibles	
	4.2.3. Identification des voies de transfert	
	4.2.4. Schéma conceptuel pour le curage	
	4.2.5.Gestion des risques	
	4.3. Situation 3 : Devenir des sédiments extraits	
	4.3.1. Caractérisation des sédiments extraits	
	4.3.2.Identification des cibles	
	4.3.4. Schéma conceptuel	
	4.3.5.Gestion des risques	
5.	CAHIER DES CHARGES TYPE ET GRILLES DE LECTURE	. 65

	5.1.	Cahier des charges type	65
	5.2.	Grilles de lecture	65
GLO)SS	AIRE	66
BIB	LIO	GRAPHIE	74
INA	NEX	E 1 : METHODOLOGIE D'ETUDE DETAILLEE DES RISQUES	75
ANI	NEX	E 1A : RECOMMANDATIONS POUR LA CARACTÉRISATION DE LA ET DES POLLUANTS	A
		1 Caractérisation chimique	
		2 Caractérisation physique	
	1A-3	3 Caractérisation toxicologique	77 77 78
	NEXI 86	E 1B : RECOMMANDATIONS POUR L'ETUDE DU TERME TRANSF	ERTS
		1 Description des transferts 1B-1.1 Potentiel de mobilisation des substances	86 87
		2 Quantification des transferts 1B-2.1 Mesure de terrain	90
ANI	NEX	E 2 : APPLICATION AUX SEDIMENTS	101
		NEXE 2A : Comportement des polluants organiques et métalliques dan sédiments	
		Caractéristiques physico-chimiques d'un sédiment	102 103
	2.	Les HAP	106
	3.	Les PCB	106
		Les métaux	107 108
	ANN	NEXE 2B : Spécificité des sédiments et des opérations de curage	116
	:	1. Caractérisation des sédiments en place	116 118 121

ANNEXE 3:	CAHIER DES CHARGES	127
ANNEXE 3A	: CAHIER DES CHARGES TYPE	128
1.	Introduction – Cadre de l'étude	129
2.	Phase A: Schéma conceptuel	130
3.	Phase B : Evaluation détaillée des risques	132
4.	Phase C/D : Documents à fournir	
5.	Phase E : Programme de réunions	135
6.	Confidentialité	
7.	Contenu de la proposition	135
8.	Rémunération	136
9.	Durée de l'étude et délais	136
10.	Pénalités	136
11.	Bordereau des coûts unitaires	137
ANNEXE 3B	: GRILLE DE LECTURE POUR LA VALIDATION DE L'EDR	139
ANNEXE 3C	: GRILLE DE LECTURE POUR L'ÉVALUATION DES OFFRES	146

1. INTRODUCTION GENERALE DU GUIDE

L'accumulation de sédiments, et leur pollution éventuelle, au fond des canaux, cours d'eau, fossés et plans d'eau est souvent accentuée par l'activité humaine. Le curage constitue alors une opération de restauration, d'entretien voire d'assainissement indispensable pour prévenir les risques d'inondation, pour rétablir le tirant d'eau pour le navigation mais aussi pour restaurer le milieu naturel.

Par exemple, en France, chaque année, en moyenne 6 millions de m³ de sédiments (dont environ 1,6 millions de m³ provenant du domanial) sont extraits des 525 000 kilomètres de cours d'eau (dont un peu plus de 7 000 kilomètres domaniaux) lors de leur simple entretien.

En fonction de la nature et de la qualité des sédiments et en l'absence de valeur réglementaire concernant le niveau de pollution des sédiments, il apparaît très souvent souhaitable d'utiliser **l'évaluation détaillée des risques** comme un outil d'aide à la gestion des sédiments : faut-il curer ? et en cas de curage, quel devenir des sédiments peut-on envisager ?...

L'objectif principal de ce guide est d'élaborer une méthodologie d'évaluation détaillée des risques pour la santé humaine et les ressources en eau destinée avant tout aux maîtres d'ouvrage et aux gestionnaires des voies d'eau, leur permettant d'appréhender et de comparer les risques liés au maintien des sédiments en fond de cours d'eau, à leur curage, leur transport et surtout leur devenir.

Initié par la thématique sédiments du Pôle de Compétences sur les sites et sédiments pollués du Nord – Pas de Calais, ce guide vient se substituer à l'annexe 8 du guide méthodologique « Enlèvement des sédiments, faut-il curer ?, pour une aide à la prise de décision ». En cours d'élaboration, ce guide a bénéficié de la contribution des observations du **C**omité **T**echnique **N**ational sur la **G**estion des **S**édiments.

? Pourquoi établir une méthodologie d'évaluation détaillée des risques?

Aujourd'hui, la gestion des sédiments (curage, transport, mise en dépôt, confinement, réutilisation, traitement, élimination...) est devenue un véritable casse-tête pour les partenaires concernés (maîtres d'ouvrage, services publics, bureaux d'études...) notamment :

- en <u>l'absence de réglementation</u> adaptée et en particulier de valeurs limites concernant les différents usages possibles pour les sédiments pollués ;
- si on considère le <u>nombre très important de substances polluantes</u> potentiellement présentes dans des sédiments constitués de matrices diverses (argileuses, limoneuses, sableuses ou grossières, matières organiques, etc.),
- car on ne dispose que d'informations partielles sur la toxicité des produits vis à vis de la santé humaine ou sur les écosystèmes, leurs interactions et les modifications physicochimiques inévitablement engendrées par le déplacement des sédiments.

En effet, sans support scientifique et méthodologique, comment :

- déterminer les mesures pertinentes à réaliser pour caractériser les sédiments ?
- interpréter les résultats des analyses et la problématique qui en découle ?
- choisir et expertiser une filière de gestion (traitement, élimination...) satisfaisante sur les plans environnementaux et économiques ?

Malgré cela, gérer les sédiment est dans de nombreux cas un **IMPERATIF** qui permet entre autres d'éviter les inondations et d'assurer la navigation...

? Qu'est-ce qu'une évaluation détaillée des risques?

Mise au point dans les années 80 aux Etats-Unis, cette méthode est largement utilisée pour définir des valeurs seuils et évaluer des situations complexes.

L'étude détaillée des risques ou EDR est la méthode qui permet d'intégrer l'ensemble des paramètres liés à une opération de gestion des sédiments et de délivrer une réponse scientifiquement valide compréhensible par des partenaires même peu avertis. Cette analyse permet alors de tirer des enseignements qui pourront aider à prendre des décisions adaptées aux spécificités de chaque situation.

Bien entendu, elle n'est pas parfaite et l'imprécision des données relatives à l'opération prévue et surtout la faiblesse des connaissances scientifiques sur les phénomènes de toxicité peuvent conduire à retenir des coefficients de sécurité très élevés qui limitent éventuellement sans raison réelle les usages des sédiments curés.

? Sur quelles bases ce guide est il établi ?

Avant que ne soit élaborée la première version de ce guide, plusieurs études ont été réalisées sur des opérations en cours ou prévues de façon à juger de leur intérêt et surtout de leur faisabilité, citons par exemple:

- ? le curage de la Scarpe à Douai,
- ? le projet de curage de la Marque urbaine et du canal de Roubaix,
- ? l'aménagement de terrains de dépôt de sédiments amenés à être transformés en aires récréatives.

La méthodologie proposée est globalement cohérente avec la politique nationale développée en matière de sites et sols pollués. Cependant, elle présente des caractères propres liés à la spécificité des sédiments, particulièrement :

- ? leur nature aquatique qui génère un milieu très particulier, rapidement anoxique sur de faibles épaisseurs donc avec une certaine inertie quant à la biodisponibilité ou la remobilisation des polluants;
- ? les perturbations inévitables (décolmattage, remobilisation, oxygénation...) de ce milieu occasionnées par les opérations de curage,
- ? l'évolution des caractéristiques physico-chimiques consécutive à la manipulation des produits à moyen et long terme (ressuyage, oxygénation, restabilisation en cas de stockage sous eau par exemple...),
- les niveaux de contamination généralement faibles comparés à ceux de friches industrielles polluées...

? Pourquoi réaliser une étude détaillée des risques sur les sédiments ? Quels problèmes peut elle résoudre ?

Les études préliminaires précédemment citées ont mis en évidence de nombreux intérets à réaliser de type d'étude, notamment :

- ? la nécessité de communication qu'induit ce type d'étude dans un domaine très complexe où de nombreux intervenants défendent des préoccupations et des intérêts très divers et parfois difficilement conciliables, les acteurs peuvent prendre des décisions correctement étayés; en outre, les pouvoirs publics et les maîtres d'ouvrage disposent d'éléments objectifs pour discuter avec d'éventuels groupes de pression (souvent opposés à un projet par manque d'informations ou de connaissances) donc développer la concertation et ainsi peut être éviter les recours,
- ? des solutions moins onéreuses et écologiquement plus satisfaisantes que le confinement sécuritaire, coûteux et mal accepté, sont aujourd'hui proposées et mises en œuvre (aménagement de chemins le long des berges, d'aires récréatives, etc.),
- ? le coût de l'étude détaillée des risques reste raisonnable même pour des opérations relativement complexes et des scénarios multiples : leur montant ne représente généralement qu'une faible fraction des investigations préliminaires à un curage et elle est minime au regard du coût des travaux...

? Quand réaliser une EDR ?

Il n'existe actuellement pas d'obligation réglementaire pour réaliser une EDR en ce qui concerne les sédiments.

Cependant, étant donné qu'elle va générer :

- ? une connaissance approfondie des sédiments, de leur contexte actuel et futur selon différents scénarios envisagés,
- ? une approche qualitative et quantitative des risques encourus lors de la gestion des sédiments,
- ? une communication large et interactive des différents partenaires...

Nous conseillons d'engager une telle étude de façon assez large dès la genèse des projets, avant le choix de solutions et surtout, dès que la gestion des sédiments risque, en fonction du contexte naturel, de causer des problèmes écologiques ou de pollution.

? Quelles sont les limites du guide ?

Le présent document est un guide méthodologique qui propose une démarche logique pour réaliser dans des conditions optimales une évaluation détaillée des risques appliquée à la gestion de sédiments avec, pour l'instant, deux cibles « finales » prises en considération :

- ? I'homme,
- ? les ressources en eau (souterraine ou superficielle)

Dans ce cas, les écosystèmes sont considérés comme des cibles intermédiaires susceptibles d'être à l'origine de transferts vers l'homme ou les ressources en eau.

La méthodologie proposée est cohérente avec la politique nationale développée en matière de sites et sols pollués qui prend cependant en considération deux autres cibles :

- ? les écosystèmes
- ? les biens matériels.

Compte tenu des connaissances actuelles et des contraintes de coûts et de délais, il nous est paru opportun de ne considérer pour l'instant que les risques pour la santé humaine et les ressources en eau.

Toutefois les risques liés aux milieux de transfert des polluants vers l'homme que sont les écosystèmes (incluant l'air, les animaux, les végétaux, etc.) sont évalués.

A moyen terme et en fonction des études en cours actuellement (notamment l'étude conduite par le CETMEF concernant l'évaluation éco-toxicologique de sédiments contaminés ou de matériaux de dragage réalisée par le CEMAGREF et l'ENTPE), l'objectif est de développer et d'intégrer au guide l'aspect méthodologique sur la cible « écosystèmes ».

Enfin, les risques liés à la présence de substances chimiques dans les sédiments ou dans les différents compartiments de transfert sont les seuls considérés; les risques physiques, nucléaires ou bactériologiques ne sont pas inclus dans cette méthodologie.

? A qui s'adresse ce guide ?

Ce guide s'adresse à tous les acteurs susceptibles de participer à des actions de gestion de sédiments et, à ce titre, il vise deux publics principaux :

- les gestionnaires des voies d'eau, maîtres d'ouvrage, administrations, services publics et privés... qui souhaitent spécialement :
 - ? savoir ce que le vocable « Etude détaillée des risques » signifie et être à même de juger l'opportunité de lancer ce type d'étude et définir les problématiques qu'elle doit aborder.
 - ? disposer d'un cahier des charges type adaptable à la situation qu'ils ont à gérer,
 - ? être à même d'expertiser les propositions qui leurs sont faites et les études qu'ils commanditent,
- les bureaux d'étude chargés de la réalisation concrète de ces études pourront ainsi disposer d'un référentiel technique et méthodologique

Ce guide s'insère dans la démarche complète de gestion des sédiments décrite dans le document : « Enlèvement des Sédiments – Guide méthodologique - Faut-il curer ? Pour une aide à la prise de décision » disponible sur le site Internet de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie (http://www.eau-artois-picardie.fr).

? Organisation générale du guide

Le guide est divisé en trois parties au delà de l'introduction :

- 1. Une présentation générique d'une **étude détaillée des risques** et des principes d'application à la gestion des sédiments en 3 phases :
 - l'élaboration du schéma conceptuel représentant la situation étudiée :
 - ? les sédiments constituant la source de danger sont caractérisés,
 - ? les populations cibles susceptibles d'être exposées au danger sont identifiées
 - ? les transferts de polluants contenus dans les sédiments vers les cibles sont évalués ;
 - la caractérisation de l'exposition des cibles aux polluants issus des sédiments en terme de fréquence et durée;
 - l'estimation quantitative du risque.

L'annexe 1 qui fournit des détails et des recommandations sur la méthodologie d'EDR (évaluation détaillée des risques) s'organise en 2 parties :

- ? L'annexe 1A fournit des recommandations pour la caractérisation des sources et des polluants,
- ? L'annexe 1B fournit des recommandations pour l'analyse des transferts..
- Une réflexion générale sur l'utilisation de l'évaluation détaillée des risques pour la gestion des risques.
- 3. Les **applications pratiques aux sédiments** notamment les situations et scénarios envisageables incluant :
 - ∠ les sédiments en place,
 - l'extraction et le transport des sédiments depuis le lieu d'extraction vers une destination finale,
 - ∠ le devenir des sédiments (validation du choix de la filière d'élimination des sédiments curés).

L'Annexe 2 présente des spécificités de la gestion des sédiments et se décompose en :

- ? L'annexe 2A : comportement des polluants organiques et métalliques dans les sédiments :
- ? L'annexe 2B : Spécificité des sédiments et des opérations de curage
- 4- Un **dossier à l'usage des gestionnaires** (maîtres d'ouvrage...) comprend des documents autonomes fournis en Annexe 3 :
 - un modèle de cahier des charges d'étude de risques,
 - des formulaires de grilles de lectures pour l'évaluation des offres et la validation d'une EDR.

2. METHODOLOGIE D'EVALUATION DES RISQUES SANITAIRES APPLIQUEE A LA GESTION DES SEDIMENTS D'ORIGINE CONTINENTALE

La notion de risque suppose :

- ? l'existence d'une source d'un danger,
- ? l'existence d'une cible pouvant subir des effets toxiques, nocifs ou physiques et
- ? le transfert du potentiel de danger de la source vers la cible.

Dans le cas de risques causés par des sédiments pollués, cette notion peut être schématisée par le diagramme suivant :



Le **danger** est une propriété intrinsèque d'un agent chimique, biologique ou physique à générer un effet néfaste ou indésirable.

Le **risque** traduit la probabilité d'apparition d'un événement (notamment une maladie) pour un individu ou dans une population pendant une période donnée *(Lellouch, dictionnaire d'épidémiologie)*

L'exposition varie notamment en fonction de l'intensité, du nombre et des voies de contacts

Par exemple, dans le cas des sédiments,

- ? la source (danger) peut être la présence de substances chimiques dans des sédiments au fond d'un cours d'eau.
- ? les substances se propagent par dissolution, puis migration vers les eaux souterraines,
- ? une cible « ressource en eau » sera alors atteinte et si cette ressource en eau est pompée dans puits d'alimentation en eau et une cible humaine peut alors être atteinte par ingestion d'eau.

Le **risque avéré** traduit la probabilité de survenue d'un accident et génère une **attitude de prévention**.

On le distinguera du **risque potentiel** (hypothétique ou plausible) qui traduit la probabilité que les hypothèses formulées soient exactes (risque de risque avéré) et génère une **attitude de précaution** (prudence).

Un risque avéré nul n'existe pas alors qu'un risque potentiel peut être nul.

Conformément au guide méthodologique du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), l'évaluation détaillée des risques a pour objectif d'évaluer les atteintes éventuelles de la présence de polluants sur les cibles suivantes :

- ? la santé humaine, considérant l'usage du site et des différents vecteurs pouvant contribuer à une migration de la pollution ;
- ? les ressources en eau ;
- ? les écosystèmes ;
- ? les biens matériels.

Le guide méthodologique d'évaluation des risques liés à la gestion des sédiments cible l'évaluation des risques pour la santé humaine et les ressources en eau. L'impact sur les écosystèmes y est abordé dans la mesure où la faune et la flore constituent un maillon de l'exposition humaine.

Certaines situations pourront nécessiter une approche plus détaillée de l'évaluation des risques pour les écosystèmes et les biens matériels. On se reportera alors au guide sur la gestion des sites pollués du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE). Ces situations pourront être identifiées par une réflexion pragmatique de l'existence d'impacts avérés (végétation impactée, poissons morts, dégradation des ouvrages, ...) ou de risques d'impact sur les écosystèmes et les biens matériels.

Le guide méthodologique d'évaluation des risques liés à la gestion des sédiments présente l'évaluation des risques pour les ressources en eau d'une manière intégrée à l'évaluation des risques pour la santé humaine. On considérera donc qu'un impact sur une ressource en eau exploitable mais actuellement non exploitée est une source de risque.

Une étude détaillée des risques comprend plusieurs phases, notamment :

- ? une phase initiale visant à établir un schéma conceptuel pour définir :
 - les acteurs (la source de pollution, le type de cible potentiellement exposée)
 - et les types de transferts des polluants vers les cibles.

Cette phase est qualitative et résulte d'une réflexion sur le site et son environnement.

? une seconde phase quantitative visant à estimer les doses auxquelles les populations susceptibles d'être en contact avec les sédiments peuvent être exposées (exposition), puis à comparer ces doses à des valeurs toxicologiques de référence, permettant ainsi d'estimer le risque encouru pour les personnes exposées et, éventuellement, de le gérer.

Ce chapitre est présenté selon les étapes communément admises d'une évaluation détaillée de risques :

- ? l'élaboration d'un schéma conceptuel ;
- ? la caractérisation de l'exposition aux sédiments ou leurs sous-produits (eaux de ressuyage...);
- ? la caractérisation et l'estimation du risque.

Une étude détaillée des risques aboutit à des décisions sur la gestion du risque. Cette prise de décisions résulte des résultats de l'étude mais aussi de facteurs socio-économiques. La gestion du risque est l'objet du chapitre 3.

Le schéma	ci-après synthétise la démarche des quatre étapes	s de l'évaluation de risques.
	Caractérisation chimique des sédiments	
Propriété	Modèle d'estimation du transport des polluants ve la cible	rs Etablissement du schéma
	Estimation des concentrations ou mesures en polluants au point d'exposition (air ambiant, eau,)	conceptuel
de l'indiv	hysiologiques 🗷 🗷 idu exposé poids)	Caractérisation de l'exposition
	Calcul de la dose journalière d'exposition (DJE)	
	∠ ∠ Données toxicologiques	Estimation du risque
	Calcul du risque d'atteinte à la santé	
	£	
	Décision	Gestion du risque

2.1. Méthode pour l'établissement d'un schéma conceptuel - Définition des termes

D'une manière générale, la démarche d'évaluation des risques s'appuie sur quatre principes applicables aux études qui seront réalisées dans le cadre de la gestion des sédiments et des opérations de curage :

- ? le principe de précaution : « l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable » (loi N°95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de la nature, dite Loi Barnier). Autrement dit, c'est l'hypothèse la plus pessimiste qui doit être retenue en cas de doute ou d'absence d'informations suffisantes lors de la prise de mesures.
- ? le principe de **proportionnalité** : il doit y avoir cohérence entre le degré d'approfondissement de l'étude, l'importance de la pollution et son incidence prévisible.
- ? le principe de spécificité: l'étude doit être réalisée, dans la mesure du possible, d'après les caractéristiques propres du site et être adaptée aux situations envisagées (usages, populations cibles).
- ? le principe de transparence : les choix des hypothèses et des outils nécessaires doivent être expliqués, de manière à livrer tous les éléments de décision aux différentes parties intéressées.

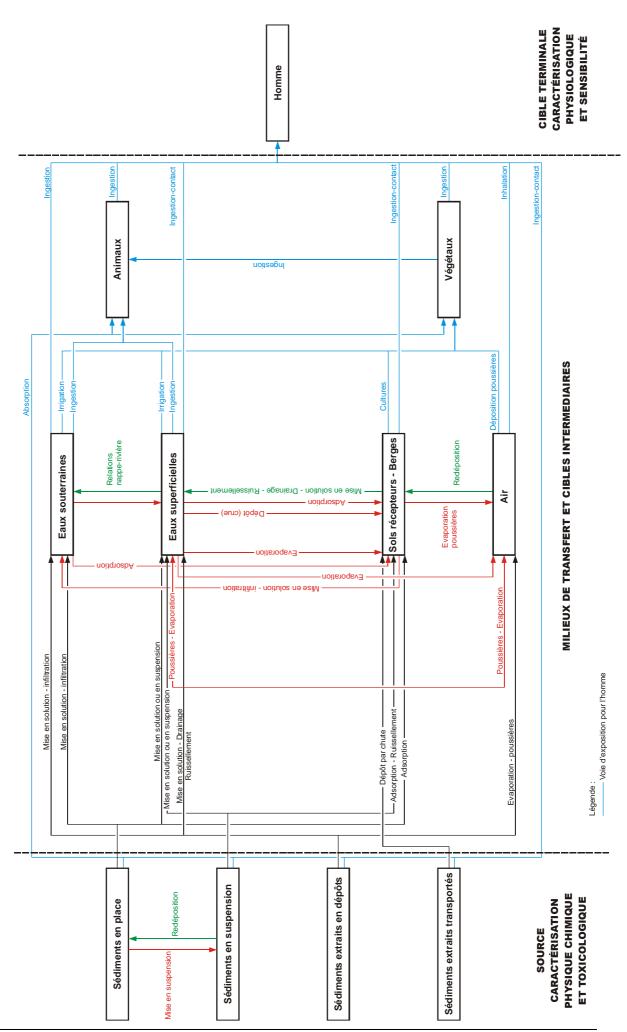
Le risque est le résultat de l'existence simultanée de trois termes :

- ? une **source** de danger : les sédiments et l'eau interstitielle contenant des substances chimiques dangereuses ;
- ? une cible, autrement dit un récepteur de la pollution : ce guide considère principalement l'homme comme la cible terminale ; la ressource en eau et les écosystèmes sont également des cibles potentielles analysées dans ce guide ; ces cibles sont souvent des cibles intermédiaires des risques pour la santé humaine.
- ? un transfert possible des substances indésirables de la source vers la cible. Ce transfert peut être direct vers l'homme ou passer par des cibles dites intermédiaires, telles que les eaux, l'air, les sols, les plantes, les animaux...

Le schéma conceptuel représente ces trois composantes du risque et leurs relations pour une situation donnée (un scénario). Etablir le schéma conceptuel consiste donc à définir et identifier de manière qualitative les différents enchaînements Source-Transfert-Cible envisageables. Les paragraphes qui suivent peuvent servir de guide à cette réflexion.

2.1.1. Schéma conceptuel initial

Le schéma conceptuel initial permet d'expliciter la ou les source(s) de contamination, la ou les cible(s) et les voies de transfert vers les cibles. Le schéma présenté ci-après est un schéma global présentant les voies d'exposition qu'il est possible de retrouver dans le cadre de la gestion de sédiments en place.



L'ensemble des enchaînements Source-Transfert-Cible ne sera pas analysé systématiquement dans chaque situation.

Ce n'est pas tant la présence de polluants dans les sédiments qui pose problème mais le fait que ces polluants soient mobilisables et donc qu'ils risquent d'affecter une population.

Le schéma sera adapté selon la situation que l'on souhaite examiner.

2.1.2. Terme source

? Définition

Les polluants dans les sédiments peuvent avoir plusieurs origines :

- une origine de pollution chronique historique : par exemple, les pertes récurrentes de produits lors de chargement / déchargement dans un port fluvial ou des rejets industriels dans un cours d'eau,
- ? une origine de pollution accidentelle liée à un incident ponctuel.

Ce guide s'adresse principalement à l'évaluation des pollutions historiques dont les effets se sont accumulés au cours du temps.

Lors de pollution accidentelles, des mesures d'urgences sont généralement mises en œuvre afin de récupérer les polluants, sans la réalisation d'une évaluation des risques. La mise en œuvre de mesures d'urgence est plus usuelle actuellement que par le passé ; des pollutions accidentelles anciennes ont donc pu également contribuer à la présence actuelle de polluants dans les sédiments.

Ce guide considère comme **source de pollution** le sédiment constitué de différents constituants physiques appelés phases.

- ? une phase solide (particules solides des sédiments),
- ? une phase liquide (eau interstitielle contenue dans les sédiments),
- et éventuellement une phase gazeuse (dissoute dans l'eau interstitielle ou sous forme de gaz dans les interstices entre les particules de sédiments).

Le risque que l'évaluateur cherche à apprécier est lié à la présence de substances chimiques qui peuvent être présentes sous différentes formes (solide, adsorbée aux sédiments, liquide, dissoute, gazeuse, ...). La source doit être définie par rapport à la répartition de ces substances dans les sédiments.

La caractérisation du terme source sera effectuée en déterminant :

- ? sa nature physique,
- ? sa composition chimique (ou celle des différentes phases),
- ? la toxicité des substances présentes,
- ? la biodisponibilité des substances.

On appelle **biodisponibilité** l'aptitude d'une substance présente dans l'environnement à être prélevée et absorbée par un organisme vivant et sa disponibilité pour interagir avec les processus métaboliques de cet organisme.

Cette caractérisation aidera à la sélection des substances pertinentes pour les étapes suivantes de l'analyse du risque (caractérisation de l'exposition et estimation du risque).

? Caractérisation physique et chimique

Une méthodologie de caractérisation des sédiments en vue d'un curage est en cours de réalisation dans le cadre du **C**omité **T**echnique **N**ational sur la **G**estion des **S**édiments. La maîtrise d'ouvrage en est assurée par la Compagnie Nationale du Rhône qui en a confié la réalisation à Tauw Environnement.

En attendant les résultats de cette étude qui sera disponible pour le 3ème trimestre 2001, la caractérisation des sédiments prendra en compte le guide méthodologique « Faut-il curer ? » et veillera à recueillir des données sur

- ? la nature physique des sédiments,
- ? la nature chimique et les concentrations en polluants dans les sédiments,
- les valeurs de <u>paramètres</u> pouvant entrer dans l'analyse <u>de l'exposition</u> (perméabilité des sols, teneur en matières organiques, pourcentages de fines, ...).

Le cas échéant, des essais en laboratoire pourront être envisagés notamment sur le changement d'état physique des sédiments (ressuyage, aération...) avec une caractérisation de chaque compartiment après changement d'état (lixiviation, percolation). Ceci permettra de prendre en compte les transformations des substances qui peuvent intervenir lors de l'extraction des sédiments, de leur remise en suspension, de leur mise en dépôt, etc.

On se reportera à l'annexe 1A pour plus de précisions sur les données nécessaires à la caractérisation de(s) la source(s) dans l'évaluation détaillée des risques.

? Toxicité

La caractérisation de la toxicité des substances présentes dans la source et la nature du danger qu'elles occasionnent est une étape cruciale qui permet d'identifier :

- ? Le type d'effet que la substance engendre, encore appelé "potentiel dangereux" : effets toxiques systémiques et effets toxiques locaux, effets cancérigènes, effets mutagènes, effets sur la reproduction et le développement, effets tératogènes.
- ? La quantification de la toxicité, exprimée par le rapport « dose d'exposition / réponse » nécessite l'identification et la recherche de valeurs toxicologiques de référence auxquelles seront comparées les doses d'exposition permettant d'identifier le risque.

Pour la quantification du risque, deux types d'effets sont à distinguer :

- ? les effets à seuil concernent les substances qui provoquent des effets toxiques à partir d'une certaine dose d'exposition; on considère qu'une exposition au-dessous de cette dose n'entraîne pas de risque pour la cible exposée.
- ? les effets sans seuil concernent les substances qui provoquent des effets quelle que soit la dose d'exposition. D'une manière générale, les substances ayant des effets sans seuil sont les substances cancérigènes, mutagènes, ou tératogènes.

Une même substance peut avoir des effets à seuil et des effets sans seuil. La nature des effets peut également varier avec la voie d'exposition.

Il en découle deux grandes familles de valeurs toxicologiques de référence dont la dénomination adoptée par la France est la suivante :

- ? **DJA ou DJT**: Dose Journalière Acceptable ou Dose Journalière Tolérable. Elles représentent des niveaux d'exposition sans risque appréciable pour l'homme.
- ? ERU: Excès de Risque Unitaire pour les effets cancérigènes. L'ERU représente la probabilité supplémentaire qu'a un individu de développer un effet s'il est exposé à la substance. Une substance peut avoir des effets sans seuil différents selon la voie d'exposition. Ainsi une substance ayant des effets sans seuil pourra avoir une ERUo pour la voie orale différente de la voie ERUi pour la voie respiratoire.

L'évaluateur se reportera à l'annexe 1A pour l'identification des effets et les recommandations pour le choix des données toxicologiques.

? Choix des substances pour l'étude

La source de pollution peut contenir un nombre important de substances. La réalisation d'une évaluation des risques pour l'ensemble des substances peut être laborieux sans apporter, pour chaque substance, de connaissances particulières sur les risques.

Une hiérarchisation des substances est alors nécessaire pour ne retenir parmi l'ensemble des substances présentes que celles susceptibles de causer des risques significatifs. Cette hiérarchisation pourra se faire considérant :

- ? la caractérisation physique de la source et la mobilisation possible ou la disponibilité des substances à la source (par exemple, le pouvoir d'adsorption et la capacité d'échange ionique des particules argileuses dans des sédiments fins tendront à réduire la mobilisation possible de certains métaux),
- ? la caractérisation chimique des polluants, en particulier leur mobilité caractérisée par leur solubilité et leur tension de vapeur (par exemple, certains métaux sont plus facilement mobilisables selon leur état de valence),
- les propriétés toxicologiques des substances ; on retiendra de préférence les substances les plus toxiques.

Les données de caractérisation de la source et de toxicité des substances pourront être résumées sous la forme d'un tableau qui servira de base au choix de substances à retenir.

Le Tableau 1 est un exemple de tableau qui permet de hiérarchiser les substances qui seront retenues pour la suite de l'évaluation.

Cet exemple montre que dans certains cas, une substance peu toxique et peu à moyennement mobile, comme le zinc, ne sera peut être pas prise en compte même si elle est détectée en concentration notable dans la source alors que les PCB détectés en concentrations beaucoup plus faibles seront pris en compte considérant leur toxicité.

Il est difficile d'établir des critères généraux pour établir le choix des substances à retenir pour l'étude. L'évaluateur établira le choix des substances au cas par cas considérant la toxicité des substances, leur disponibilité à la source et leur mobilité.

Cette première étape de sélection sera affinée et le cas échéant modifiée à mesure de l'établissement du schéma conceptuel.

Tableau 1. : Exemple de paramètres de sélection des substances à prendre en compte dans le terme source pour évaluer les risques qu'il présente

	ψ	Disponibilité : Phase où la substance est présente		Mobilité				
Substance	Toxicité	Solide	Eau	Vapeur	Lixiviabilité	Solubilité	Tension de vapeur	Prise en compte dans l'EDR
Zinc		+++	++		+	+		non
РСВ	+++	+	+	-	+/-	+	-	oui

? Sources d'information

L'annexe 1A précise les sources d'information sur la toxicité des substances.

L'annexe 2A fournit des détails concernant le comportement des polluants organiques et métalliques dans les sédiments.

2.1.3. Terme cible

? Définition

D'une manière générale, la cible est le récepteur vivant ou environnemental des substances indésirables, provenant des sédiments (source), qui constituent une source de danger. Dans le cadre de ce guide, les cibles finales considérées sont l'homme et les ressources en eau.

Dans le cadre de la gestion des sédiments de curage, les voies d'exposition des cibles (l'homme, les ressources en eau) au danger (les sédiments) peuvent être :

- ? **directes** : l'homme est exposé sans intermédiaire à la source (par exemple, ingestion de sédiments : eau et particules solides) ;
- ? indirectes ou intermédiaires : les polluants sont d'abord transférés vers des cibles intermédiaires avant de parvenir jusqu'à l'homme. Les cibles intermédiaires les plus fréquentes sont :
 - les eaux souterraines ou superficielles,
 - les végétaux,
 - les animaux,
 - l'air et les sols récepteurs, ou
 - plus généralement les écosystèmes.

L'exposition humaine peut avoir alors lieu au travers :

- ? de la chaîne trophique (alimentation en eau et en produits d'origines animale et végétale),
- ? mais aussi des différents usages de l'eau (baignade, sports nautiques, pêche, alimentation du bétail, irrigation et arrosage...).

Certaines de ces cibles intermédiaires, en particulier les eaux superficielles ou souterraines,, peuvent également être considérées comme des cibles finales dans le cas où elles peuvent servir à l'alimentation en eau sans être exploitées au moment de l'étude.

Le guide EDR sédiments prend en compte les écosystèmes comme cibles intermédiaires : on se reportera au guide du MATE pour une caractérisation du risque pour les écosystèmes en tant que cible finale si nécessaire.

Les voies d'exposition de la cible homme sont de trois types :

? Ingestion directe:

- de sédiments :
- d'eau contaminée ;
- d'aliments d'origine végétale ou animale ayant concentré des substances polluantes ;
- ? **Absorption par contact cutané** avec les sédiments, l'eau contaminée, les poussières (sédiments extraits et secs) ;
- ? **Inhalation** : substances sous forme gazeuse, substances adsorbées sur les poussières, substances dissoutes dans la vapeur d'eau.

? Identification

L'identification des cibles est réalisée à l'aide du recensement des usages (avérés, imposés ou probables) des sols au voisinage, des eaux superficielles, des eaux souterraines, des sédiments curés et des zones de dépôts.

L'identification des cibles doit également considérer les impacts potentiels sur les différentes phases (solide, eau, vapeur). Le recensement des cibles doit être aussi exhaustif que possible et considérer les usages et les pratiques, actuels et futurs.

Les cibles humaines potentiellement exposées aux substances contenues dans les sédiments sont en général :

- ? les populations présentes au voisinage immédiat de la zone où se trouvent les sédiments,
- ? les personnes impliquées dans leur manipulation lors du curage et du transport (employés des entreprises réalisant les travaux),
- ? les personnes exposées de manière indirecte à la suite de transfert des polluants (par exemple, les personnes ingérant de l'eau pompée dans une nappe recevant des eaux s'infiltrant au travers des sédiments et solubilisant au passage certaines substances présentes dans les sédiments).

On analysera les activités de chacune de ces population pour identifier leurs scénarios d'exposition (activités professionnelles, activités de loisir, ...).

Les ressources en eau (cours d'eau, plans d'eau, nappes d'eau souterraine...) sont également considérées comme des cibles finales lorsqu'elles sont potentiellement exploitables même si elles ne sont pas exploitées au moment de l'étude.

Notons que des nappes différentes seront considérées comme des cibles séparées selon les conditions géologiques du site.

? Sensibilité

La **sensibilité** d'une cible traduit la rapidité de la réaction qu'elle manifeste à la suite d'une pollution.

La sensibilité de la cible dépend de ses caractéristiques propres et du schéma d'exposition. Donc l'ensemble des paramètres qui définissent une cible caractérise en même temps sa sensibilité.

Ainsi la sensibilité de la cible humaine est fonction des paramètres physiologiques : poids, âge, durée de vie, taux d'ingestion d'eau ou de sédiments, taux d'inhalation, durée d'exposition probable, etc.

Un enfant est une cible plus sensible qu'un adulte. En général, les populations sensibles sont les nourrissons, les enfants, les femmes enceintes, les personnes âgées, les malades, ... Dans certains cas, les travailleurs, avertis ou non, pourront être considérés comme une cible plus sensible s'ils sont soumis à de fortes expositions ou considérant qu'ils inhalent des quantités d'air plus importantes pendant les efforts physiques.

La sensibilité de la ressource en eau dépend entre autres de:

- ? la nature des sédiments et du sous-sol qui les sépare de la nappe (par exemple une situation de sédiments fins reposant sur des sols argileux conduira souvent à une faible migration des substances présentes et donc une moindre sensibilité d'une nappe sousjacente pouvant servir de ressource en eau),
- ? ses usages (la sensibilité devrait être moindre dans un port fluvial que dans une zone de loisirs où la baignade est pratiquée...),
- ? la protection naturelle, notamment géologique, des ressources en eau souterraine,
- ? la proximité des points d'utilisation de la ressource par rapport à la source (exemples : distance source puits d'adduction d'eau potable, distance point de décolmatage du fond d'un canal curé puits, distance source captage d'eau de surface...).

Le schéma d'exposition pourra comporter des cibles intermédiaires et la sensibilité de la cible finale pourra alors dépendre de la sensibilité de celles-ci. La sensibilité des écosystèmes, en tant que cible intermédiaire, est fonction:

- ? du niveau de transfert du polluant entre la source et la cible intermédiaire,
- ? de l'aptitude des écosystèmes à fixer la substance polluante (exemples : végétaux et animaux).
- ? de l'effet sur la cible intermédiaire.
- ? du nombre d'intermédiaires dans la chaîne trophique.

L'usage des cibles intermédiaires (exemple : ingestion de végétaux cultivés sur une zone de dépôt) pourra accroître la sensibilité sur l'homme.

? Choix des cibles

Les paragraphes précédents permettent de conduire l'analyse critique d'une situation spécifique et ainsi d'établir une liste conséquente de cibles exposées à des risques potentiels. La hiérarchisation des cibles permet de retenir les plus pertinentes vis à vis de la situation étudiée.

Chaque choix fera l'objet d'une analyse critique en s'aidant des principes de base de l'étude (principe de précaution, principe de proportionnalité, principe de spécificité, principe de transparence).

Ainsi on pourra privilégier comme cible la population ou la ressource en eau la plus exposée ou la plus sensible.

? Sources d'information

L'analyse critique de la situation étudiée est essentielle pour l'identification des pratiques et usages actuels et futurs. La recherche des cibles potentielles comprend également une compréhension du contexte socio-culturel local. Ce contexte peut être apprécié au travers de contacts avec les administrations locales.

Plus spécifiquement l'Annexe 1A fournit des sources d'informations. Pour les ressources en eau, on veillera à prendre en compte les schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE, SDAGE).

2.1.4. Terme transfert

? Définition

Le terme de transfert représente la migration des substances contenues dans les sédiments (source) vers la cible (homme, ressource en eau). Cette migration peut s'effectuer au travers des différents compartiments environnementaux (sédiments déposés ou remis en suspension, eaux, sol, air), des végétaux et des animaux.

La chaîne de transfert d'une substance depuis la source jusqu'à l'homme peut être décomposée en trois phases :

- ? départ de la source : mobilisation des substances présentes dans les sédiments vers les autres compartiments environnementaux ;
- ? déplacement dans l'espace : d'un compartiment à un autre ou à l'intérieur d'un compartiment ;
- exposition de la cible : transfert à l'intérieur d'un compartiment jusqu'à la cible finale (exemple : ingestion, inhalation ou contact par l'homme).

La définition des transferts consiste à décrire cette chaîne en identifiant et quantifiant les phénomènes mis en jeu. Il peut exister plusieurs cibles intermédiaires avant d'atteindre la cible finale.

? Description du Transfert / Phénomènes mis en jeu

Le transfert d'une substance peut impliquer deux types de phénomènes :

- ? Transport physique sans transformation de la substance ; ce mode de transport résulte de la remise en suspension par la vie aquatique et les activités humaines (par exemple, passage de bateau).
- ? Transport physique avec transformation (chimique, biologique ou physique) de la substance qui peut, dans certains cas, induire une modification de son potentiel dangereux, en particulier lors :
 - de l'aération des sédiments consécutive à son enlèvement ou à son ressuyage,
 - de la dégradation des substances donnant lieu à des sous-produits aux propriétés différentes de la substance mère,
 - de remobilisation des polluants par chélation.

Dans le cas des substances biodégradables, l'évaluateur s'appliquera donc à rechercher les sous-produits et les intègrera dans l'évaluation détaillée des risques.

Une liste non exhaustive des principaux phénomènes mis en jeu lors des transferts à partir des sédiments ou à travers les différents compartiments environnementaux est présentée dans le Tableau 2.

Tableau 1. : Compartiments environnementaux et voies d'exposition pour l'homme

Compartiment vers lequel le transfert a lieu	Principales voies d'exposition pour l'homme
Eaux souterraines	Pompage, ingestion (alimentation en eau), irrigation et ingestion de végétaux, abreuvement du bétail et ingestion d'animaux, contact dermique
Eaux superficielles	Contact dermique, ingestion, irrigation et abreuvement du bétail, alimentation en eau
Règnes végétal et animal	Ingestion
Sol	Contact, ingestion
Air	Inhalation de vapeurs ou de poussières

Un tableau spécifique à la situation étudiée pourra être établi en identifiant les phénomènes mis en jeu.

En plus des transferts directs (ingestion, contact cutané, inhalation), les transferts des substances jusqu'à l'homme peuvent être indirects et les substances sont d'abord transportées au travers de différents compartiments de la source avant d'atteindre l'homme. C'est en fait le compartiment vers lequel est transférée la substance qui détermine la voie par laquelle l'homme peut être exposé. Le Tableau 3 identifie les voies d'exposition indirectes et les compartiments associés.

? Quantification des transferts

La quantification des transferts est abordée dans le paragraphe 2.2.1 sur l'évaluation des concentrations aux points d'exposition.

Tableau 2. : Phénomènes mis en jeu lors des transferts

	Situation	Compartiment ou cible intermédiaire vers le ou laquelle le transfert a lieu	Phénomènes mis en jeu
		Eaux superficielles	Mise en suspension, solubilisation
		Eaux souterraines	Solubilisation (relation rivière - nappe), infiltration
		Berges et sols irrigués	Infiltration et adsorption
Sédiments en place		Végétaux	Fixation des substances biodisponibles dans l'eau et les sédiments, suite à l'irrigation ou la croissance en milieu aquatique, bioturbation
		Animaux	Ingestion d'eau, de sédiments, de végétaux ou d'animaux contaminés, bioturbation
		Eaux superficielles	Mise en suspension et solubilisation
		Eaux souterraines	Solubilisation (relation nappe-rivière et décolmatage du lit)
Curage des sédiments	Phase A : Curage	Air	Dégagement de gaz (sulfure d'hydrogène, méthane, dioxyde de carbone)
		Végétaux	Fixation des substances biodisponibles dans l'eau, suite à irrigation ou croissance en milieu aquatique
		Animaux	Ingestion d'eau, de végétaux ou d'animaux contaminés.
	Phase B : Transport des sédiments curés	Eaux superficielles	Ruissellement
		Eaux souterraines	Ruissellement et infiltration
		Air	Evaporation, dispersion atmosphérique.
		Sols récepteurs	Déposition de sédiments entraînés par ruissellement, lixiviation, infiltration, drainage
Devenir des sédiments curés : - mise en dépôt - épandage - réutilisation avec / sans traitement		Eaux superficielles, dont eaux de ruissellement et d'exhaure	Drainage / ressuyage, lixiviation et ruissellement
		Eaux souterraines	Drainage, lixiviation, ruissellement et infiltration
		Végétaux	Fixation des substances biodisponibles dans l'eau, suite à irrigation ; culture sur sédiments, berges ou sols contaminés
		Animaux	Ingestion d'eau, de végétaux contaminés
		Air	Evaporation, dispersion atmosphérique.

? Choix des transferts retenus pour l'étude

Il peut ne pas être envisageable de mener l'étude pour l'ensemble des transferts envisagés à moins de produire une étude volumineuse et peu facile à comprendre.

Un choix des transferts principaux s'avère bien souvent nécessaire. Ce choix doit être fondé sur une analyse critique du recensement des transferts et une hiérarchisation qualitative de leur prépondérance.

Par exemple, on pourra privilégier un transfert par ingestion de végétaux cultivés sur une zone de dépôt de sédiments à l'ingestion de végétaux exposés aux envols de poussières.

Le rejet de certaines voies de transfert sera documenté. Le cas échéant, des approximations pourront être faites lors de l'analyse de sensibilité afin de prendre en compte certains transferts rejetés.

Comme pour le choix des substances, il n'existe pas de critères systématiques pour le choix des transferts qui seront retenus pour une analyse plus détaillée. La hiérarchisation des transfert prendra cependant en compte la mobilité des substances, la rapidité des transferts (dans certains cas, on pourra privilégier les transferts ayant moins de cibles intermédiaires) et le flux de substances potentiellement transféré.

? Sources d'information

Les sources d'information pour la caractérisation des sources et la recherche des cibles servent également à l'identification des transferts.

L'Annexe 1B fournit des informations complémentaires sur l'analyse des transferts.

2.1.5. Etablissement du schéma conceptuel final retenu pour évaluer les risques liés à la gestion des sédiments

L'étape finale de l'établissement du schéma conceptuel est la synthèse des trois termes :

- ? La source de pollution constituée par les sédiments contenant les substances indésirables retenues pour l'analyse des risques (rappelons que les critères de sélection de ces substances sont notamment leur présence en quantité significative, leur toxicité et leur mobilité...)
- ? La ou les cibles, principalement les ressources en eau et l'homme (cible terminale), mais aussi des cibles intermédiaires que sont les eaux souterraines et superficielles, l'air, les sols, les végétaux et les animaux. Les cibles potentielles sont identifiées en recensant les activités et les usages possibles du site où se trouvent les sédiments (en place, lors du curage, lors du transport et enfin, sur le lieu de leur destination ou de leur utilisation).
- Les **transferts** effectifs entre la source et la cible seront mis en évidence par l'étude de toutes les voies de migration possibles des substances présentes dans la source. Les voies de transfert retenues dans le schéma conceptuel sont celles qui aboutissent à l'exposition d'une ou plusieurs cibles, autrement dit, celles permettant à une substance présente dans les sédiments de migrer jusqu'à la cible finale.

Le schéma conceptuel ne représente que les "chaînes" complètes liant la source à la cible par l'intermédiaire des transferts. S'il manque un des termes (source, cible ou transfert), le risque n'existe plus et la "chaîne" n'a plus lieu d'être dans le schéma conceptuel.

Le schéma conceptuel pourra être représenté sous la forme d'un graphique. Les applications à des situations types sont données au Chapitre 4.

Le schéma conceptuel est également un outil de communication concernant la situation existante et/ou future et sur la gestion qui pourra être envisagée.

2.2. Caractérisation de l'exposition aux sédiments

La caractérisation de l'exposition est l'étape suivant le schéma conceptuel. Elle ne peut être réalisée que si les trois termes (Source - Transfert - Cible) du schéma conceptuel ont été définis.

Cette caractérisation consiste à estimer (à l'aide de calculs ou de mesures) la concentration ou la dose d'exposition d'une cible à une substance chimique présente dans un milieu (sédiments, eau, air) pendant une période donnée.

Dans le cadre de l'évaluation détaillée des risques appliquée aux sédiments de curage, l'exposition estimée est celle de l'homme et des ressources en eau aux substances présentes dans les sédiments ou issues des sédiments.

- Pour l'homme, l'exposition est évaluée par la quantité de substances entrant en contact avec les barrières d'échanges de l'organisme donc susceptible d'être absorbée. L'évaluation comprend ainsi l'estimation quantitative d'une concentration d'exposition, puis d'une dose d'exposition.
- Pour les ressources en eau, l'évaluation de l'exposition conduit à l'estimation du flux transféré à la ressource et à l'estimation de la concentration dans la ressource là où elle est exploitée ou exploitable.

2.2.1. Evaluation des concentrations d'exposition

Pour l'homme, les points d'exposition sont les zones où les cibles humaines sont susceptibles d'entrer en contact avec les substances chimiques provenant des sédiments.

Pour les ressources en eau, les points d'exposition sont les zones (parties de cours ou de plan d'eau, nappe) où les ressources en eau sont exploitées ou susceptibles d'être exploitées.

Les points d'exposition sont déterminés lors de l'établissement du schéma conceptuel.

Les concentrations d'exposition peuvent être déterminées soit par la mesure au point d'exposition, soit par une modélisation du transfert.

? Mesure directe

Les concentrations d'exposition directement mesurées sur le site au point d'exposition sont à privilégier, dans la mesure du possible, par rapport à la modélisation. Ce peut être le cas lorsque l'échantillonnage est réalisable au point de contact substance – cible : eau d'un puits d'alimentation en eau potable, contact direct avec les sédiments...

Des prélèvements dans certains milieux, comme l'air ou certaines matrices organiques par exemple, peuvent être plus délicats. La mesure directe permet d'obtenir des données réelles mesurées, mais ponctuelles ; elles ne permettent pas de connaître l'évolution dans le temps des transferts. On veillera alors à évaluer les incertitudes et la variabilité de ces mesures.

? Modélisation des concentrations

La modélisation de l'exposition est utilisée

- ? lorsque les échantillonnages et mesures n'ont pas pu être effectués au point d'exposition,
- ? lorsque l'étude est prédictive
- ? pour évaluer la variabilité des mesures.

Différents paramètres permettent de rendre compte au travers de modélisations des transferts depuis les sédiments (source) vers la ou les cibles, à travers les compartiments environnementaux. Ils sont liés aux propriétés intrinsèques des substances, aux conditions du milieu source, aux caractéristiques des milieux traversés, et à des paramètres extérieurs tels que le climat ou l'existence possible de barrières de confinement.

Les transferts peuvent être représentés de manière mathématique à l'aide d'outils de modélisation. De nombreux modèles disponibles permettent d'étudier les transferts entre les compartiments environnementaux (notamment sédiments - eau, eau - sous-sol), mais aussi les phénomènes de bioaccumulation dans les végétaux et les animaux.

Un modèle est basé sur des équations qui transcrivent mathématiquement les transferts. Ces équations peuvent traduire le phénomène :

- ? de manière empirique,
- ? découler de simplifications des équations complètes (méthodes analytiques),
- ? ou être résolues par itération jusqu'à l'obtention d'une solution (méthodes **numériques**).

Deux types de modèles existent :

- ? les modèles déterministes, où l'utilisateur détermine les valeurs des paramètres d'entrée à partir des données dont il dispose (terrain, littérature...)
- ? les modèles stochastiques où les variations des paramètres d'entrée du modèle sont prises en compte sous la forme de lois de distribution sur la base d'une analyse statistique des données de terrain.

Les équations de transfert du modèle sont résolues grâce aux données acquises qui caractérisent les milieux et les produits.

L'évaluateur se reportera à l'Annexe 1B pour les modélisations des différentes voies de transfert entre les milieux identifiés.

? Recherche d'informations

Les modèles font intervenir des paramètres non mesurables ou non mesurés sur le terrain, notamment les propriétés intrinsèques des substances, certaines données géologiques, hydrogéologiques et, dans tous les cas, les données climatiques. Ces paramètres doivent alors être estimés ou obtenus par une recherche bibliographique. On portera une attention particulière au choix des paramètres lors de modélisation.

Les sources d'informations auxquelles il est possible de se référer sont données en Annexe 1A.

2.2.2. Evaluation des doses d'exposition

Le calcul des doses d'exposition ne concerne que l'évaluation des risques pour l'homme.

La dose d'exposition intègre numériquement la concentration d'exposition sur une période de temps considérant les différents scénarios d'exposition et les caractéristiques des cibles. L'évaluation des doses d'exposition nécessite un certain nombre d'hypothèses concernant :

- ? la physiologie des personnes, ces paramètres diffèrent selon que la cible est enfant ou adulte, ou qu'il s'agit d'une population sensible ou non.
- des paramètres spécifiques du comportement et les activités (travail, loisirs, ...) de la cible et de la voie d'exposition ; ces paramètres sont spécifiques du scénario d'exposition évalué (par exemple, quantité de poussières inhalées par jour, quantité de végétaux ou de poisson ingérée, ...).
- ? la durée d'exposition et la durée de vie.

Certains paramètres nécessaires au calcul de doses sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 2. : Exemples de paramètres d'exposition

Paramètres physiologiques	 ? Poids, ? Surface de tout ou partie du corps, ? Age, ? Durée de vie (par convention : 70 ans), ? Taux d'ingestion, ? Taux d'inhalation (susceptible de varier selon la période de la journée et des activités - intensité d'efforts)
Paramètres spécifiques d'exposition	 ? Fréquence d'exposition (nombre de jours par an), qui peut être fonction des saisons, ? Quantités de végétaux, d'animaux ou de poisson ingérée, ? Fraction du temps par jour pendant laquelle l'individu est exposé, ? Durée d'exposition (nombre d'années), ?

Les modalités d'exposition peuvent être issues soit d'études fournissant des données réelles appliquées au site (enquête de proximité ou étude statistique), soit d'hypothèses justifiées et adaptées au cas traité.

D'une manière générale, les quantités de polluant administrées, exprimées en dose journalière d'exposition (en mg/kg/j), peuvent se définir de la façon suivante :

$$DJE ? \frac{C*Q*T*F}{P*T_m}$$

où:

- PDJE : Dose journalière d'exposition liée à une exposition pour le transfert et la voie d'exposition considérés (en mg/kg/j)
- ? C: Concentration d'exposition (eau souterraine, eau superficielle, sol, aliments,...)
- ? Q : Quantité (de sol, d'eau ...) administrée par jour par la voie d'exposition considérée

- ? T: Durée d'exposition (années)
- ? F: Fréquence d'exposition : nombre de jours d'exposition par an (jours/an)
- ? P: Poids corporel de la cible (kg)
- ? Tm : Période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée (jours)

Le formule ci-dessus permet de calculer la dose administrée qui est la quantité rendue disponibles à l'absorption par l'organisme mais qui est plus élevée que la dose absorbée qui est la quantité passant effectivement dans l'organisme. En général, on considère dans une première approche et par mesure de précaution que la totalité de la dose administrée est absorbée.

Des Doses Journalières d'Exposition (DJE) sont calculées pour chaque substance, chaque voie d'exposition et chaque scénario.

En général l'évaluation détaillée des risques prend en compte essentiellement des expositions chroniques (sur une longue durée : quelques années à la vie entière) et subchroniques (durée allant de quelques semaines à plusieurs mois par exemple pour la femme enceinte). Des expositions aiguës (de courte durée, au contact de fortes concentrations de polluants) peuvent également être considérées dans le cas où elles présentent un risque supérieur à celui engendré par l'exposition chronique.

2.3. Caractérisation et estimation du risque

La caractérisation du risque est l'étape finale de l'évaluation des risques.

Dans cette étape finale, les données de toxicité et les informations concernant l'exposition des cibles sont comparées sous la forme d'une expression quantitative du risque.

La quantification du risque doit inclure le fait que :

- ? les voies d'exposition peuvent être multiples ;
- ? les substances peuvent être multiples ;
- ? les modes d'exposition peuvent être multiples.

2.3.1. Caractérisation du risque pour les ressources en eau

La caractérisation du risque pour les ressources en eau est réalisée par comparaison des concentrations aux points d'exposition avec les objectifs de qualité pour la ressource en eau. Ces objectifs de qualité dépendent notamment de l'usage de la ressource.

Dans le cas d'un usage pour l'alimentation en eau potable, les objectifs de qualité sont les concentrations maximales admissibles fournies par le décret du 3 janvier 1989 modifié, ou à défaut les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé.

Dans le cas d'autres usages, les objectifs de qualité pourront dépendre d'études spécifiques à l'usage de la ressource (en particulier pour un usage industriel) ou de critères établis dans le cadre de SAGE et de SDAGE.

2.3.2. Caractérisation du risque pour la santé humaine

Le risque est évalué sous la forme d'une probabilité (substance cancérigène sans seuil) ou d'un indice (substance à seuil). Dans les deux cas, il intègre la dose d'exposition et la toxicité liée à une dose donnée.

? Estimation du risque pour les effets "sans seuil"

Pour les substances ayant des effets « sans seuil », le risque s'exprime sous la forme d'un Excès de Risque Individuel (ERI). Il s'agit de la probabilité qu'a la cible de développer l'effet associé à la substance (par exemple effet cancérogène) du fait de l'exposition considérée.

L'ERI est calculé pour chaque substance et chaque voie d'exposition à partir de la Dose Journalière d'Exposition (DJE) et de l'excès de risque unitaire (ERU).

L'expression de l'ERI est supposée linéaire pour les niveaux d'exposition et de risques faibles :

ERI = DJE x ERUo pour la voie orale

ERI = DJE x ERUi pour la voie respiratoire

Pour des niveaux d'exposition et de risques forts (probabilité supérieure à 1 %), l'expression n'est plus linéaire :

$$ERI = 1 - exp(-DJE \times ERU)$$

Suivant les recommandations du Ministère de l'Environnement, un ERI global est ensuite calculé. Il s'agit d'effectuer trois sommes successives :

- ? pour chaque substance, la somme des risques liés à chacune des voies d'exposition ;
- ? la somme des risques pour chaque substance considérée ;
- ? la somme des risques liés aux différentes durées d'exposition (chronique, subchronique et aigüe).

Par ce calcul, on considère que les substances et leurs effets sont indépendants, même lors d'une exposition conjointe à plusieurs substances. Cependant, le pouvoir cancérigène d'un mélange est différent de la somme des pouvoirs cancérigènes des substances pures.

Conformément aux recommandations du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, il est considéré que :

- ? Si l'excès de risque calculé (ERI) est supérieur à 10⁻⁴, le risque sera considéré comme inacceptable ;
- ? Si l'excès de risque calculé est inférieur à 10⁻⁵, le risque sera considéré en général comme acceptable.

? Estimation du risque pour les effets à seuil

Un indice de risque, IR, est calculé pour les substances ayant des effets à seuil. Cet indice correspond au ratio de la dose journalière d'exposition par rapport à la dose journalière acceptable. Il est calculé pour chaque substance, chaque voie d'exposition et chaque cible.

En terme d'indice de risque IR calculé :

- ? Si IR < 1, le risque est acceptable ;
- ? Si IR > 1, le risque est inacceptable.

? Adéquation des données toxicologiques

En première approche, on considère l'additivité des risques liés à l'exposition à plusieurs substances considérées individuellement.

Dans un deuxième temps, et dans le cadre d'une appréciation affinée du risque, on pourra :

- ? distinguer les risques selon les voies d'exposition si les données toxicologiques suggèrent que les effets ne se manifestent pas de la même manière que la voie d'administration de la substance,
- ? distinguer individuellement les risques de différentes substances si les données toxicologiques suggèrent que ces substances n'induisent pas d'effets selon les mêmes mécanismes ou sur les mêmes organes,

- vérifier si les données toxicologiques ont été établies pour des durées d'exposition similaires à celles prises en compte dans le cas étudié et apporter le cas échéant des facteurs correctifs,
- ? apporter, le cas échéants, des corrections aux données toxicologiques pour prendre en compte les taux d'absorption par l'organisme humain.

On se reportera à l'Annexe 1A pour une discussion plus élaborée de l'adéquation des données toxicologiques. Ces corrections pour ajuster les données toxicologiques doivent cependant être faites avec beaucoup de prudence pour garantir que le résultat de l'étude reste sécuritaire.

2.4. Analyse des incertitudes et validité des études

La validité d'une évaluation des risques est liée à la validité de toutes les informations introduites dans l'analyse, tant au niveau des données sur la caractérisation chimique de la source et des hypothèses des scénarios d'exposition (utilisation des sédiments cibles potentielles, projets d'aménagement,), qu'au niveau des données ou propriétés des substances (données physico-chimiques et toxicologiques des polluants, données physiologiques des cibles).

L'évaluation des incertitudes vise à :

- ? apprécier la validité et les incertitudes des valeurs attribuées aux différents paramètres introduits dans les calculs de concentrations et de doses d'exposition ;
- estimer les domaines de variation des paramètres qui affectent le plus les résultats afin de conduire l'analyse de sensibilité qui évaluera les variations des risques selon les variations des données d'entrée.

Cette démarche critique de validation prend en compte chacune des étapes de l'évaluation des risques :

- ? la caractérisation de la source,
- ? la quantification des transfert,
- ? la caractérisation du risque.

Le schéma d'exposition peut être un bon support pour identifier les paramètres pour lesquels des variations peuvent avoir lieu.

Il est au minimum nécessaire d'expliquer et de justifier les choix des paramètres intervenant dans la détermination du risque et d'apprécier si les choix conduisent à une surestimation ou une sous-estimation des risques. Cette analyse comprendra également une évaluation de la variabilité des paramètres (dans le temps, l'espace et entre les individus) et leur sensibilité (domaine de variation selon les données sources).

Cette analyse permettra d'identifier les points où l'incertitude peut être minimisée soit par la considération de valeurs plus réalistes (comparées à des valeurs initiales trop sécuritaires) soit par des mesures complémentaires ciblant la réduction des incertitudes pour certains paramètres.

? Incertitudes concernant la caractérisation de la source

Les trois types de paramètres entrant dans l'évaluation des risques caractérisent la source :

- ? La nature des substances considérées. L'étude doit prendre en compte tous les composés pertinents afin de rester sécuritaire. On évaluera à nouveau si certains composés non retenus dans l'étude devrait être pris en compte.
- ? Les paramètres physiques de la source : dimension, profondeur, propriétés géotechniques des matériaux (stratification des sédiments, stratigraphie des couches géologiques, perméabilité et porosité du milieu, ...).
- ? La caractérisation chimique de la source : mesures des concentrations qui montrent en général une plage de résultats. Le choix de la valeur caractérisant la source est alors

important (valeur moyenne, borne supérieure de l'intervalle de confiance à 80 ou 95%, choix des données retenues pour l'analyse statistique des résultats).

? Incertitudes concernant le transfert des substances

Les incertitudes concernant le transfert proviennent :

- ? des mesures dans le milieu de transfert lorsqu'elles sont utilisées pour estimer l'exposition. Souvent, elles sont en nombre restreint et leur représentativité peut être mise en doute en particulier si les concentrations dans le milieu fluctuent dans le temps. Les incertitudes sur ces mesures peuvent résulter
 - d'incertitudes d'analyse Les incertitudes d'analyse en laboratoire sont dues aux problèmes de répétabilité et de reproductibilité des mesures analytiques.
 - d'incertitudes liées aux échantillonnages.
- des paramètres de modélisation du comportement des polluants (solubilité, coefficient de partage sol/matière organique/eau, volatilité, coefficient de diffusion, perméabilité,...). Les références bibliographiques consultées pour la recherche de ces données pourront indiquer plusieurs valeurs différentes pour un même paramètre. Ces variations proviennent d'incertitudes dans la quantification des paramètres. La comparaison des valeurs disponibles pourra conduire à l'estimation d'une incertitude sur la valeur choisie.
- ? des modélisations (incertitudes des approximations mathématiques des phénomènes réels). D'une manière générale, les modèles de transferts et d'exposition disponibles dans la littérature sont majoritairement sécuritaires.

? Incertitudes concernant les cibles et leur exposition

L'évaluateur devra s'assurer que le recensement des cibles et des voies d'exposition est complet.

L'incertitude sur la quantification de l'exposition (calcul des doses) pourra dépendre du comportement des cibles intermédiaires et des individus exposés (présence d'habitats d'animaux, nature et usage des cultures, fréquence d'exposition de l'homme – en particulier pour les scénarios de contact et d'ingestion de végétaux, d'eau, de viande, ou de poisson,...).

? Incertitudes concernant la toxicité

Les données toxicologiques disponibles seront examinées pour établir leur adéquation aux scénarios d'exposition étudiés (conditions d'exposition, natures des cibles...).

Les données toxicologiques sont assorties de facteurs de sécurité, qui peuvent dans certains cas être supérieurs à 1 000.

2.5. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité consiste à apprécier la variabilité des risques selon les variations des différents paramètres entrant dans l'évaluation. La définition des variations des paramètres d'entrée résulte de l'analyse des incertitudes.

L'analyse de sensibilité peut dans un premier temps être évaluée en faisant varier les paramètres d'entrée un à un. Cette analyse sera réalisée pour les paramètres ayant soit les plus grandes variations soit ayant la plus grande incidence sur les calculs de risques.

Dans un deuxième temps, on pourra attribuer des fonctions de probabilité à différents paramètres entrant de manière prépondérante dans la caractérisation du risque et ainsi assimiler le risque à une loi de distribution. On pourra alors décider que la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95% ou 98% doit correspondre à un risque acceptable.

3. GESTION DES RISQUES

L'évaluation détaillée des risques est un outil d'aide à la décision. Si l'évaluation des risques permet d'identifier les mécanismes conduisant à l'existence de risques considérés comme inacceptables, elle peut également servir de support pour décider d'actions pour maîtriser ces risques.

Ce chapitre fournit quelques bases de la réflexion sur la gestion des risques. Le chapitre 4 complète ces bases par des éléments spécifiques à chaque situation analysée.

A titre d'exemple, si l'EDR concernant un dépôt de sédiments montre qu'il existe un risque inacceptable en cas d'utilisation du dépôt pour faire pousser des cultures maraîchères, on envisagera de gérer ce risque par des usages où le risque est acceptable comme les plantations d'arbres. Comme indiqué précédemment, la notion de risque implique l'existence d'une source, d'un transfert et d'une cible. La gestion du risque pourra donc agir sur chacun de ces termes afin que les actions prévues conduisent à une maîtrise du risques.

Par ailleurs, la maîtrise des risques peut passer par des études complémentaires destinées à améliorer la connaissance des risques et ainsi confirmer ou infirmer leur existence.

La gestion des risques implique la participation d'un certain nombre d'intervenants impliqués de plus ou moins près aux études réalisées et ayant des intérêts divers (et parfois divergeants). Le fondement de la gestion des risques ne sera donc pas seulement technique et les implications socio-économiques, culturelles et politiques devront être prises en compte dans le choix final des moyens de gestion des risques appropriés à la situation étudiée.

? Amélioration de la connaissance du risque

Rappelons qu'un certain nombre de paramètres sont utilisés dans l'évaluation des risques et que des mesures ne sont pas systématiquement disponibles ou réalisables pour établir les valeurs spécifiques à la situation considérée.

D'autre part, les mesures du niveau de pollution à la source, dans le milieu de transfert et à la cible peuvent également être limitées en nombre et en qualité.

Dans ce cas, l'évaluation réalisée peut être entachée d'incertitudes importantes et une succession d'hypothèses sécuritaires, se substituant à des mesures, peut conduire à conclure qu'il existe un risque sans que son existence ne soit fondée sur des données rigoureuses.

Dans une première approche, l'évaluation des incertitudes permet d'apprécier l'impact sur la quantification des risques de variations des données de base et des paramètres nécessaires à affiner l'analyse. Cependant cette approche pourra être insuffisante pour valider les conclusions de l'étudeet il serait alors judicieux d'envisager de réaliser des études complémentaires visant à réduire les incertitudes de l'évaluation réalisée.

Ces études viseront d'abord à maîtriser les incertitudes sur les données de base et les paramètres prédominants dans les scénarios d'exposition conduisant aux niveaux de risques les plus élevés, par exemple :

- si des niveaux de risques élevés sont calculés pour une exposition par l'usage de la nappe, l'objectif est alors d'affiner l'évaluation des risques et les décisions à prendre pour maîtriser les risques et des études hydrogéologiques complémentaires (piézomètres, essais de perméabilité, essais de pompage, ...) pourront permettre d'apprécier plus précisément la présence des polluants dans la nappe, la stratigraphie des sols, la transmissivité des aquifères et la migration des polluants de la source vers les puits de pompage de la nappe.
- si des niveaux de risques élevés sont calculés pour une exposition consécutive à la mise en culture d'une zone de dépôt, des études complémentaires pourront cibler la collecte d'informations sur la bio-accumulation spécifiques aux polluants et aux cultures envisagées. Ces études pourront comprendre des essais de cultures et l'analyse de la présence des polluants dans les récoltes. Si des restrictions concernant certaines cultures sont prises, il conviendra de se prémunir contre les changements d'affectation à moyen ou long terme.
- si des niveaux de risques élevés sont calculés pour une exposition par l'ingestion de poissons, des campagnes de pêche et d'analyse des poissons pourront être réalisées pour collecter des informations spécifiques de la bio-accumulation des polluants dans les sédiments du plan ou du cours d'eau considéré.

? Maîtrise de la source

Des actions peuvent être entreprises sur la source pour réduire les risques :

- la résorption de la source. Réalisée au moins de manière partielle lors d'un curage, dans d'autres situations comme dans le cas d'un dépôt existant, cette solution sera souvent onéreuse et ne pourra pas être envisagée de manière systématique.
- le confinement de la source. Il existe peu de moyens pratiques de confinement des sédiments au fond d'un plan ou d'un cours d'eau de grande étendue. Cette méthode est plus facilement applicable à un dépôt de sédiments par la mise en place d'une couverture par exemple.
- le traitement de la source pour réduire la migration des polluants. Ces traitement ne seront en général applicable que pour de faibles volumes.
- la gestion des rejets au milieu naturel de manière à éviter la reformation de dépôt de sédiments pollués.

Maîtrise des transferts

La maîtrise des transferts visera le plus souvent à réduire la migration dans le milieu. Certaines mesures de maîtrise de la source permettent également de maîtriser les transferts (par exemple la mise en place d'une couverture).

? Actions au niveau des cibles

Les actions au niveau des cibles sont bien souvent réduites à :

- ? la mise en place de servitudes d'usage des sols (par exemple : restriction à des cultures non alimentaires, restriction d'accès d'une zone de dépôts) Si des restrictions sont prises dans ce sens, il conviendra de se prémunir contre les changements d'affectation à moyen ou long terme (inscription aux hypothèques...).
- ? la mise en place de servitudes d'usage des ressources en eau (par exemple : restriction d'usage des eaux de la rivière, interdiction de la pêche ou de la baignade, ...)
- ? la mise en place d'un suivi afin d'apprécier les impacts et les risques et de permettre de prendre les mesures appropriées si l'exposition tend à augmenter.

4. APPLICATION AUX SITUATIONS

Ce chapitre aborde plusieurs modes de gestion des sédiments. Un descriptif technique est d'abord présenté pour chaque situation abordant également les contraintes spécifiques (types de curage, modes de transports, traitement et destination des produits, contraintes environnementales et de voisinage...), puis les éléments de l'évaluation détaillée des risques sont présentés comprenant :

- ? les moyens à mettre en œuvre pour la caractérisation des sédiments (l' « étude méthodologique de caractérisation des sédiments en vue d'un curage de canaux, cours d'eau, fossés, plans d'eau » est en cours dans le cadre du comité national sur la gestion des sédiments sous maîtrise d'ouvrage de la Compagnie Nationale du Rhône ; le rapport définitif devrait être disponible pour juin 2001),
- ? les paramètres à acquérir pour la réalisation de l'EDR,
- ? les investigations nécessaires pour une bonne connaissance du site,
- ? les voies potentielles de transferts vers la cible considérée.

Les voies d'expositions sont recensées mais ce recensement ne constitue qu'une approche générale et des adaptations **au cas par cas** devront être réalisées. Un schéma conceptuel simplifié est également présenté pour chacune des situations.

Pour une lecture plus aisée, un descriptif du comportement des polluants métalliques et organiques dans le contexte particulier des sédiments est présenté en annexe 2A.

Ce chapitre reprend les 3 situations possibles :

- ? sédiments en place : l'évaluation des risques sur la situation actuelle du plan d'eau concerné permettra de discuter l'éventualité de non intervention,
- ? le **curage** au sens de l'extraction des sédiments et le transport depuis le lieu d'extraction vers un site de destination finale.
- ? le **devenir des sédiments** extraits : l'EDR vise à valider le choix de la filière de gestion des sédiments curés.

Dans chacune des situations, ce chapitre fournit des informations et des recommandations pour :

- 1. <u>Caractériser les sédiments</u> donc la source dans son milieu initial (méthodes d'investigations, d'analyses chimiques et physiques, et interprétation),
- 2. <u>Caractériser les cibles potentielles</u> en s'attachant tout particulièrement aux usages actuels ou éventuels futurs du milieu aquatique et de son environnement,
- 3. Identifier des voies de transfert,

afin d'établir le schéma conceptuel.

Enfin ce chapitre aborde la gestion des risques pour chacune des situations.

4.1. Situation 1 : Sédiments en place

Il existe de nombreux cours d'eau ou plans d'eau présentant une pollution des sédiments pour lesquels la qualité de l'eau est bonne car il y a peu d'échange entre les eau et sédiments. Toutefois cet équilibre peut être rompu en raison :

- de modifications des conditions physico-chimiques du milieu suite à des changements de températures de l'eau, à la remise en suspension des sédiments (lors de crues, augmentation du traffic de bateaux, ...)
- ? d'un changement d'utilisation du plan d'eau (baignade, pêche,...)
- ? de travaux résultant de nécessités hydrauliques (navigation, inondation...).

L'élaboration d'un programme de caractérisation des sédiments et une analyse initiale des cibles et des transferts permettra d'évaluer la nécessité de réaliser des échantillonnages des sources potentielles et des analyses des voies de transfert. Ces investigations pourront fournir des mesures directes réduisant les besoins de modélisation des transferts lors de l'EDR.

4.1.1. Caractérisation des sédiments

Cette caractérisation de la source donc de la nature des sédiments en place s'appuiera sur des méthodes d'échantillonnage et sur des déterminations analytiques rigoureuses.

Le programme de caractérisation décrira notamment:

∠ La connaissance détaillée de la situation

La situation concernée pourra être caractérisée en utilisant le guide d'enquête de la phase C du guide méthodologique « Faut-il curer ? » (phase C – étude préalable).

On s'attachera tout particulièrement au contexte géographique du site et à l'occupation des sols au voisinage de la zone concernée. Sur la base d'une étude historique et documentaire, on recherchera les aménagements qui ont pu conduire à des rejets de substances vers le cours ou le plan d'eau et toutes les indications sur la pollution potentielle du milieu. Si aucune information n'est disponible quant aux composés susceptibles d'être présents dans les sédiments, on se reportera à l'Annexe 2B pour la détermination analytique.

∠ Des méthodologies d'échantillonnage

Des méthodologies d'échantillonnage sont décrites dans le guide méthodologique « Faut-il curer ? » (voir en particulier les annexes 4, 5 et 6 de ce guide). Ce guide précise les protocoles de prélèvements des échantillons.

Le programme d'échantillonnage localisera les points de prélèvement, par maillage ou par choix de stations représentatives de la partie du cours d'eau à investiguer.

Le programme décrira également le choix des méthodes d'échantillonnage représentative de l'épaisseur des sédiments à curer. Les techniques et leurs conditions

d'application (bennes, dragues, carottiers...) sont décrites dans l'Annexe 5 du guide "Faut-il curer?".

∠ Déterminations analytiques

Les analyses doivent être, dans la mesure du possible, réalisées conformément aux normes en vigueur. Les normes utilisées doivent être mentionnées sur les bordereaux de résultats d'analyse. Les analyses porteront sur :

la détermination des caractéristiques physiques des sédiments (teneur en eau, granulométrie, densité, vitesse de sédimentation),

la caractérisation chimique des polluants organiques (hydrocarbures, carbone organique total, ...) et des polluants minéraux (métaux, ...). L'Annexe 6 du guide méthodologique "faut-il curer?" liste les composés qu'il convient d'analyser de manière systématique. Les autres éléments seront fonction de résultats de l'étude historique.

Les annexes 2A et 2B fournissent des indications et des recommandations sur les analyses à réaliser qui seront adaptées à chaque situation considérée.

NB: Pour les ports maritimes, une méthodologie portant sur le prélèvement et l'analyse des déblais de dragage des ports maritimes a été publiée par le Ministère de l'Equipement, du Logement, de l'Aménagement du Territoire et des Transports associés au Ministère Délégué chargé de l'Environnement (référence n°641, DEPPR/SE-QE/JMM-JC). Cette méthodologie, présentée en Annexe 15 du guide méthodologique « Faut-il curer ? », aborde les modes d'échantillonnage et d'analyse des matériaux de dragage.

4.1.2. Identification et caractérisation des cibles

L'identification des cibles peut se faire à partir des usages identifiés pour le site. Les principaux usages d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau peuvent être :

- ? la navigation : commerciale, plaisance,
- ? les loisirs :
 - les sports nautiques : canoë-kayak, pédalo, ski-nautique, barque ...
 - la baignade.
 - la pêche,
- ? la production d'eau potable ou industrielle (pompage dans le cours d'eau ou le plan d'eau ou dans les nappes alimentées par celui-ci)
- ? l'alimentation en eau du bétail ou du gibier,
- ? l'irrigation et l'arrosage : agricole, domestique (jardins potagers),
- ? ...

Tous les usages existants ou prévisionnels seront recensés et analysés. Une attention particulière sera apportée à la définition des modes d'interactions avec les sédiments.

Par exemple le pêcheur exerçant cette activité depuis la rive peut être exposé aux polluants dans les sédiments par l'ingestion de poissons ou par contact cutané direct des sédiments sur la berge. Dans d'autres cas, on considérera la remobilisation des polluants résultant de la navigation marchande sur un canal.

Le recensement des usages du plan ou du cours d'eau permettra d'identifier les cibles - en veillant en particulier à identifier les cibles les plus sensibles. L'homme, en tant que cible terminale, sera caractérisé par un certain nombre de paramètres spécifiques à son usage du plan ou du cours d'eau.

Dans le cas de sédiments en place, les cibles peuvent être :

- ? les riverains : adultes et enfants qui pourront être exposés de manières directes et indirectes aux sédiments lors de la vie quotidienne au bord du plan d'eau, ou lors d'évènements exceptionnels tels que les crues qui peuvent conduire à la déposition de sédiments en surface (par exemple dans des potagers);
- ? les personnes qui utiliseront le site de manière récréative, dans le cadre d'un scénario de baignade, de promenade ou de pêche : la population exposée correspond à des enfants et des adultes.

Les populations adultes et enfants sont distinguées dans l'EDR.

Les cibles ressources en eau sont intégrées dans les schémas conceptuels d'exposition présentés dans ce chapitre. On veillera en particulier à intégrer les usages prévus par les SAGE et SDAGE même si ces usages ne correspondent pas à ceux qui ont lieu lors de l'étude (une nappe pourra être considérée comme exploitable dans une SAGE ou SDAGE sans qu'elle soit exploitée au moment de l'étude).

4.1.3. Identification des voies de transfert

L'analyse de la situation étudiée considérera l'ensemble des voies de transfert possibles des sédiments vers les récepteurs intermédiaires (sol, sous-sol, eaux souterraines, eaux superficielles, air, faune, flore...) et vers le récepteur final (l'homme).

Des exemples des différentes voies de transfert retenues dans le cadre de l'Etude Détaillée des Risques pour le contexte « Sédiments en place » sont présentés Tableau 5.

Tableau 5 : Situation sédiments en place - Voies de transfert possibles

Cibles intermédiaires	Modes de transfert
Eaux superficielles	 Remise en suspension et migration des polluants vers l'aval, solubilisation, Pompage pour l'alimentation en eau potable, l'alimentation du cheptel, l'irrigation, etc.
Eaux souterraines	 Solubilisation et migration des polluants vers la/les nappe(s) d'eau souterraine, Pompage pour l'alimentation en eau potable, l'alimentation du cheptel, l'irrigation
Flore	- Fixation et bio-accumulation des micro-polluants biodisponibles contenus dans la matrice du sédiment et dans l'eau.
Faune	 Ingestion de végétaux contaminés, Bioaccumulation de particules fines contaminées ou de composés dissous.
Air	- Envol de poussières après ressuyage des sédiments déposés par une crue, émanation de gaz de fermentation, aérosols

Lors de la caractérisation de la situation, des mesures pourront être faites afin de confirmer ou d'infirmer les voies de transfert considérées. La caractérisation par échantillonnage et analyse du milieu aquatique et de son environnement proche aidera aussi dans l'évaluation des transferts. Dans certains cas, la faune et de la flore du plan d'eau considéré et de ses abords immédiats pourront être analysées.

Les voies d'exposition possibles de l'homme sont l'ingestion de sédiments, d'eau, d'animaux ou de végétaux, le contact direct ou l'inhalation de vapeurs émises. Ces voies d'exposition sont détaillées dans le schéma conceptuel.

4.1.4. Schéma conceptuel pour les sédiments en place

Le schéma conceptuel permet de résumer les voies de transfert des polluants identifiés vers les cibles. En fonction du compartiment environnemental, on distinguera les voies d'exposition suivantes :

- ? Ingestion directe de sédiments ;
- ? Ingestion d'aliments d'origine végétale ;
- ? Ingestion d'aliments d'origine animale (animaux domestiques ou gibiers, poissons) ;
- ? Ingestion d'eaux polluées ;
- ? Contact cutané avec les sédiments et l'eau ;
- ? Inhalation de polluants sous forme gazeuse ;
- ? Inhalation de polluants adsorbés sur les poussières.

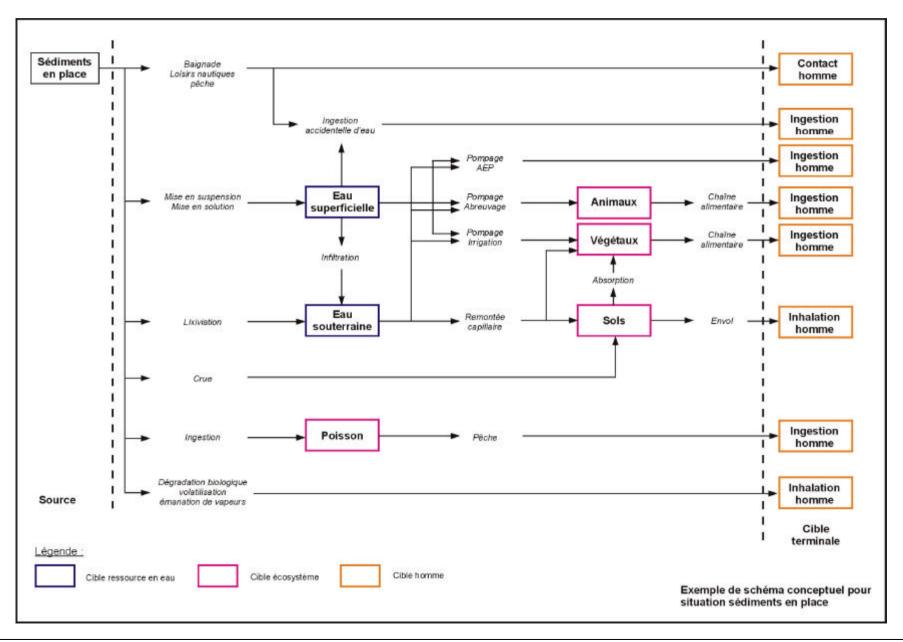
Un tableau récapitulatif en fonction des catégories de populations cibles pourra être établi ainsi qu'un schéma. Deux exemples de schémas conceptuels résumant les cibles et les transferts possibles à partir de sédiments en place sont donnés aux pages suivantes.

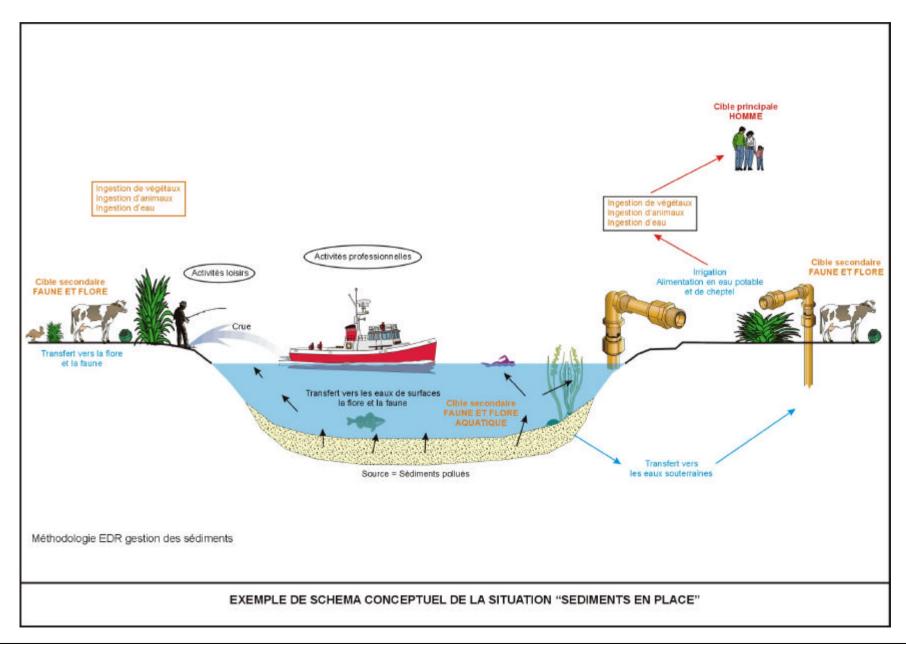
4.1.5. Gestion des risques

La gestion des risques dans le cadre de sédiments en place peut consister en :

- l'amélioration des connaissances des voies d'exposition afin de réduire les incertitudes souvent liées à l'absence de données. Les données à recueillir doivent alors permettre d'améliorer l'évaluation des risques pour les voies d'exposition conduisant aux niveaux de risques les plus élevés (par exemple l'analyse de végétaux, de poissons si aucune donnée n'est disponible pour ces cibles intermédiaires).
- ? la mise en place de servitudes en limitant certains usages afin de restreindre les transferts. On pourra ainsi instaurer des servitudes sur l'usage des sols, des eaux de surface et des eaux souterraines. Les restrictions d'usage sont cependant limitées pour certaines voies d'exposition ; il pourra être difficile de faire respecter l'interdiction de la pêche ou l'utilisation de l'eau pour un usage d'abreuvage du bétail ou pour l'irrigation.
- ? la prise de décision concernant certains usages actuels du cours d'eau. On pourra par exemple décider l'abandon de captages dans le cours d'eau pour l'alimentation en eau potable.
- ? la réalisation d'opération de curage afin d'extraire la source de pollution. L'opération de curage pourra être partielle pour extraire les sédiments les plus pollués.

?	la mise en place d'un suivi pour vérifier qu'il n'existe pas de dégradation des conditions évaluées. Le suivi pourra porter sur la qualité des sédiments et de l'eau du cours ou du plan d'eau. On pourra également envisager un suivi des eau souterraines à proximité de captage servant à l'alimentation en eau humaine, industrielle, ou agricole.





4.2. Situation 2 : Le curage et le transport des sédiments curés

? Le curage

Le curage est une opération technique qui est souvent la cause de perturbations du plan ou du cours d'eau et de remobilisation des sédiments donc des polluants. Les perturbations sont observées pendant la durée des travaux mais aussi sur une période plus ou moins longue de retour à l'équilibre du système hydro-biologique. Dans le cas de sédiments pollués, les travaux peuvent avoir des conséquences importantes non seulement dans la zone curée et à son aval mais également sur les eaux souterraines par décolmatage du fond qui favorise le transfert de polluants vers les eaux souterraines.

Dans le cadre du curage d'un plan ou d'un cours d'eau, qu'il soit total ou partiel, une situation mixte s'établit, comprenant :

- ? des sédiments qui restent en place,
- ? des sédiments mis en suspension, et
- ? des sédiments curés, qu'il faudra transporter vers une destination.

Dans le cas de l'établissement d'un projet en site particulièrement sensible, la prise en compte des risques spécifiques est de première importance.

Différentes techniques de curage existent et on citera ici pour mémoire :

- ? le curage mécanique,
- ? le curage hydraulique,
- ? le curage pneumatique,
- ? le curage à l'hélice ou à "l'américaine"...

Le descriptif et les domaines d'application de ces méthodes sont donnés dans l'Annexe 2B. Ces méthodes ont des implications directes sur les caractéristiques des sédiments qui sont extraits.

Le choix du type de matériel le mieux adapté au contexte du curage est guidé les paramètres suivants :

- ? le devenir des produits de curage,
- ? le contexte environnemental du lieu des travaux de curage,
- ? la nature physique des sédiments à extraire : granulométrie, teneur en eau, ...
- ? la nature et l'importance du plan ou du cours d'eau : vitesse du courant, perméabilité des rives et du fond, largeur et profondeur du lit, conditions d'accès...,
- ? le volume de matériaux à évacuer et leur répartition sur la zone concernée,
- ? la stabilité et la nature des berges.
- ? les modes de transport envisageables pour les sédiments curés.

Après curage, le fond du cours ou du plan d'eau est constitué d'un mélange de sédiments restants avec le terrain naturel sous-jacent.

? Le transport des sédiments curés

Dans la grande majorité des cas, hormis pour le régalage sur berges, les sédiments curés doivent être transportés depuis le lieu d'extraction vers une destination finale de stockage, d'utilisation, de traitement....

Les principaux modes de transport sont le camion, la barge ou le chaland, la drague suceuse porteuse, le pipeline (conduites de refoulement), le convoyeur, voire le train pour quelques situations exceptionnelles.

Le choix du mode de transport sera lié :

- ? à la destination des sédiments extraits,
- ? à la distance entre le lieu de curage et la destination,
- ? à la nature des sédiments à transporter,
- ? au volume des matériaux à évacuer,
- ? à l'itinéraire du transport (traversée de zones sensibles)...

Le transport, qu'il soit terrestre ou nautique, peut représenter une source de risque à prendre en compte dans l'établissement des projets. La dispersion des polluants par des coulées de sédiments et d'eau, les phénomènes de dégazage des sédiments (gaz de fermentation, vapeurs toxiques, COV, odeurs...) qui pourraient survenir lors de la manipulation et du transport des sédiments (benne ouverte par exemple), doivent être évalués.

4.2.1. Caractérisation des sédiments extraits et modifications induites par le mode de curage et de transport

On se reportera à la section 4.1.1 pour la caractérisation des sédiments à extraire.

Les modes de curage et de transport ont une incidence importante sur les risques notamment parce qu'ils occasionnent une modification de la qualité des milieux concernés. Les risques peuvent être accrus par une modification de la qualité des matériaux consécutive à l'oxydation et/ou à la dissolution/volatilisation de substances présentes dans les sédiments.

Le curage pourra induire une dispersion de la pollution présente dans les sédiments et il pourra être envisagé de réaliser une étude initiale du système biologique et hydraulique en aval de la zone concernée. Cette étude pourra porter sur les paramètres suivants :

- ? la qualité des eaux avant les travaux,
- ? la détermination de l'indice biotique,
- ? l'étude de la faune et la flore du milieu aval avant le curage.

Des essais de laboratoires pourront être réalisés afin d'estimer le comportement des sédiments. Ces essais pourront viser à caractériser :

- ? la remise en suspension des sédiments (quantité, granulométrie...),
- ? la remobilisation de la charge polluante .
- ? la nature chimique des fractions mises en suspension,
- ? les modifications du milieu contenant les polluants : passage sous forme vapeur, complexation, oxydation, ...

Une liste des paramètres physiques et chimiques qui peuvent être analysés est donnée en annexe 2B. L'annexe 2A précise quels types de polluants rechercher.

4.2.2. Identification des cibles

L'identification des cibles se fera à partir d'une analyse des méthodes envisagées pour l'extraction des sédiments et leur transport. Les cibles sont a priori les mêmes que pour la situation « sédiments en place » auxquelles on ajoutera le recensement des secteurs sensibles traversés lors du transport des sédiments :

- ? écoles, quartier résidentiels,
- ? utilisation de la rivière ou du plan d'eau (notamment les ponts),
- ? réseaux d'égouts existants, fossés, bassins d'orage...

Une première évaluation qualitative des impacts potentiels du curage et du transport des sédiments sera faite pour établir les cibles à retenir considérant les moyens d'interventions prévus et la maîtrise qu'ils apportent pour prévenir la pollution en cas d'accidents,...

D'une manière générale, les cibles peuvent être :

- ? les opérateurs réalisant l'extraction et le transport des sédiments. Ces personnes sont des adultes de 20 à 60 ans, qui pourront être exposés aux polluants par ingestion de sédiments ou d'eau, contact cutané et inhalation de poussières et de vapeurs. Les conditions d'exposition de chaque opérateur pourront être variables selon leur poste de travail. Les postes de travail devront donc être analysés afin d'établir les paramètres les plus appropriés qui les caractérisent.
- les riverains qui pourront être en contact avec les sédiments dans le cadre de leurs activités: promenade, baignade ou pêche. On veillera à la spécificité de certaines expositions durant le transport, notamment l'évaluation de situations de déversements. Les riverains sont constitués d'une population d'adultes et d'enfants qui pourront être exposés par ingestion, contact cutané, et inhalation de poussières et de vapeurs.

Comme pour la situation des sédiments en place, les cibles ressources en eau sont intégrées dans l'analyse de l'exposition de la santé humaine.

4.2.3. Identification des voies de transfert

On recensera les voies de transfert possibles entre le milieu et ses composantes (sol, soussol, eaux souterraines, eaux superficielles, air, faune, flore...) et l'homme.

Un exemple des différentes voies de transfert et de récepteurs intermédiaires retenus dans le cadre de l'Etude Détaillée des Risques pour le contexte « Travaux de curage » est présenté Tableau 6.

Les voies de transfert et d'exposition sont en général les mêmes que dans le cas des sédiments en place. Cependant les transferts sont aggravés par la remise en suspension des sédiments par le curage, les déversements éventuels lors du transport, et le décolmatage éventuel du fond du plan d'eau.

4.2.4. Schéma conceptuel pour le curage

Le schéma conceptuel résume les voies de transfert des polluants identifiés dans les matrices minérales et organiques vers les populations cibles. En fonction du compartiment environnemental, on distinguera les voies d'exposition suivantes :

- ? Ingestion directe de sédiments ;
- ? Ingestion d'aliments d'origine végétale ;
- ? Ingestion d'aliments d'origine animale (animaux domestiques et gibier, poissons) ;
- ? Ingestion d'eaux polluées ;
- ? Contact cutané avec les sédiments et l'eau ;
- ? Inhalation de polluants sous forme gazeuse ;
- ? Inhalation de polluants adsorbés sur les poussières .

Un tableau récapitulatif en fonction des catégories de populations cibles pourra être établi, ainsi qu'un schéma. Deux exemples de schémas conceptuels résumant sources-cibles-transferts sont présentés aux pages suivantes.

Tableau 6 : Situation curage des sédiments - voies de transfert

Cibles intermédiaires	Modes de transfert
Eaux superficielles	- Remise en suspension et migration des polluants vers l'aval , solubilisation,
	- Pompage pour l'alimentation en eau potable, l'alimentation du cheptel, l'irrigation, etc.
	- Mise en suspension et entraînement par les eaux de ruissellement de sédiments répandus en surface.
Eaux souterraines	 Migration des polluants vers la/les nappe(s) d'eau souterraine par décolmatage du lit de la rivière, solubilisation, Pompage pour l'alimentation en eau potable, l'alimentation du cheptel, l'irrigation, etc. Infiltration d'eau de ruissellement polluée.
Flore	- Adsorption des micro-polluants libérés, bio-accumulation, - Envasement à l'aval.
Faune	Ingestion de végétaux contaminés,Adsorption et/ou ingestion des micro-polluants libérés,Bio-accumulation
Air	Envol de poussières après ressuyage des sédiments, émanation de gaz de fermentation, aérosols

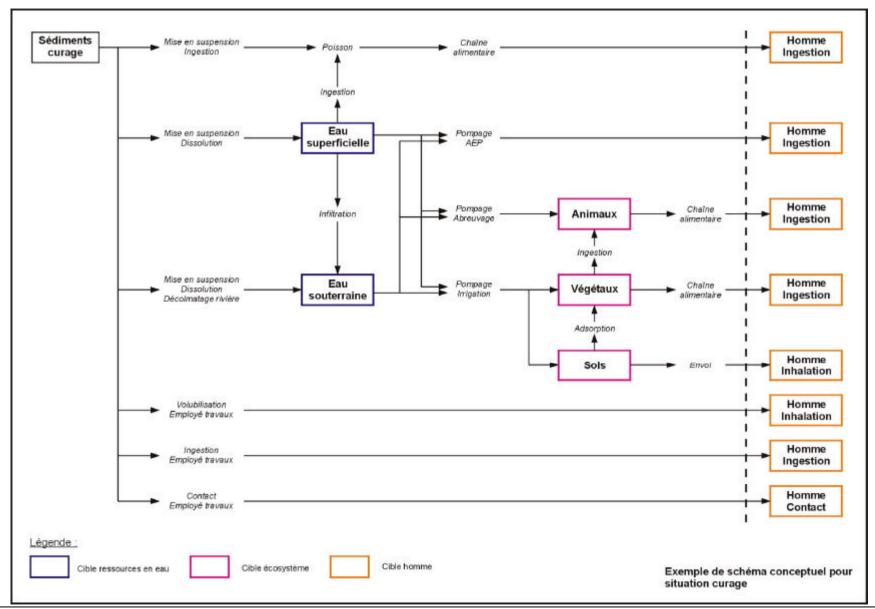
4.2.5. Gestion des risques

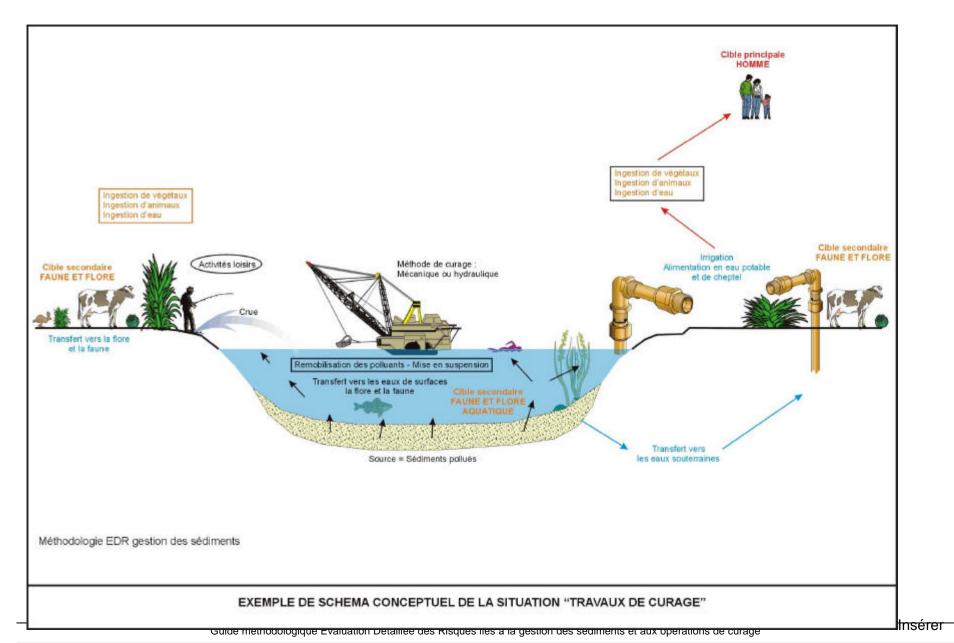
La gestion des risques dans le cadre d'une opération de curage et de transport des sédiments peut consister à :

- ? choisir un mode et du matériel de curage limitant la remise en suspension et la dispersion des sédiments. Des outils de curage spécifiques aux sédiments pollués ont été développés pour :
 - obtenir une bonne précision de la profondeur de curage.
 - maîtriser la mise en suspension des sédiments pendant le curage,
 - contrôler l'épaisseur résiduelle de sédiments laissés en place pour éviter le décolmattage du fond,
 - maîtriser la quantité d'eau extraite avec les sédiments.

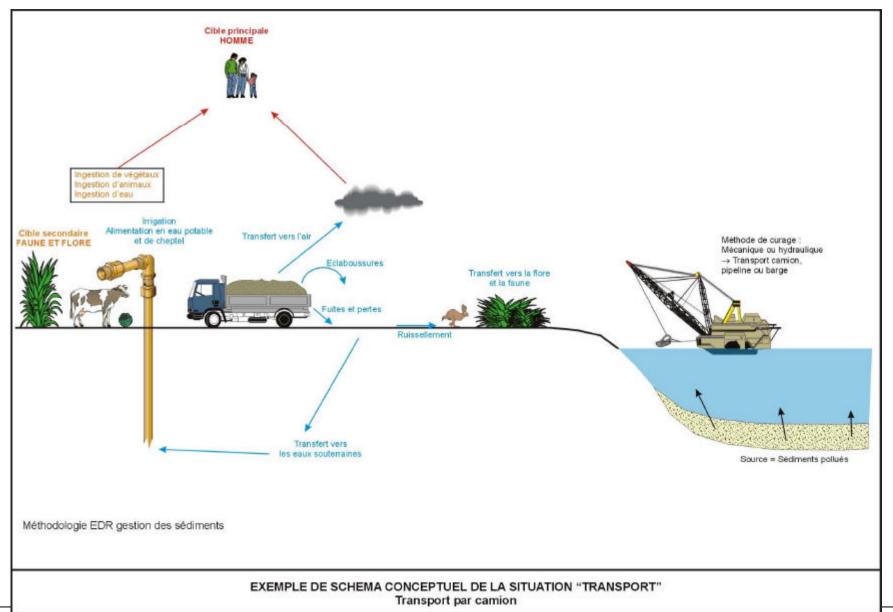
Les techniques de curage seront retenues considérant les risques induits par la remise en suspension.

- ? choisir les moyens et le tracé du transport pour limiter les risques :
 - de détérioration des milieux de transfert,
 - de déversements accidentels,
 - d'exposition lors d'un déversement (modification du tracé pour éviter une zone sensible).
- mettre en place un suivi du milieu aquatique pendant les travaux afin de mesurer les impacts et la zone où ils se produisent et de décider des restrictions d'usages temporaires pendant et après les travaux (interdiction de la pêche, arrêt de pompages dans le cours ou le plan d'eau pendant les travaux, arrêt temporaire de captages dans les nappes pouvant subir une augmentation des transferts de pollution pendant les travaux,...)
- ? mettre à disposition des moyens de prévention pour réduire l'exposition (moyens de nettoyage des routes utilisées pour le transport, ...).
- ? réaliser un curage partiel pour éviter le décolmatage du fond du cours ou du plan d'eau et ainsi contrôler les transferts vers la nappe.





57



4.3. Situation 3 : Devenir des sédiments extraits

Le devenir des sédiments extraits recouvre une multitude de situations et cas de figures, depuis l'épandage sur les berges, jusqu'au confinement complet en bassin étanche en passant par différents types de valorisation.

Un panorama des différentes solutions existantes ou étant couramment mises en œuvre est abordé dans ce guide. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive, de nombreuses variantes sont possibles. Toutefois les voies de transfert et les modes d'exposition restent globalement similaires (sauf dans le cas de traitements spécifiques).

Les solutions techniques envisageables pour les sédiments extraits sont citées ici pour mémoire et reprises en détail dans l'Annexe 2B :

- ? le traitement des produits de curage (déshydratation, inertage...) avec une éventuelle valorisation,
- ? le régalage sur berge,
- ? l'épandage,
- ? la mise en dépôt sur « sol sain »,
- ? la mise en dépôt confiné,
- ? la mise en décharge,
- ? le réemploi des sédiments dans des activités de construction de bâtiments et de travaux publics,
- ? la mise en dépôt sous eau (clapage...),
- ? le dragage à l'« américaine » des sédiments poussés vers l'aval.

Les situations de dragage à l'américaine et de clapage présentent des spécificités en termes d'évaluation des risques dont l'analyse se rapproche de la situation 2.

4.3.1. Caractérisation des sédiments extraits

Le comportement des polluants dans le site récepteur sera largement dépendant du mode de curage et de l'éventuel traitement qui sera effectué. En effet un curage hydraulique avec transport par canalisation pourra entraîner une oxydation importante des sédiments et un tri granulométrique dans le bassin de dépôt. Les phénomènes d'oxydo-réduction peuvent alors être à l'origine d'une remobilisation des polluants ou d'une dégradation des polluants (cas de molécules organiques).

La réalisation, en laboratoire ou sur maquette, de simulations du comportement des sédiments dans le site récepteur peut permettre de valider un mode de curage et de transport adaptés aux contraintes du site.

Les paramètres à analyser et les méthodes d'échantillonnage seront appliqués au devenir envisagé.

4.3.2. Identification des cibles

L'identification des cibles sera effectuée sur la base des destinations envisagées pour les sédiments curés.

Il pourra être considéré :

- ? Les agents d'entretien ou les exploitants : le site peut être affecté à une utilisation spécifique qui entraîne des actions d'entretien et de surveillance régulières. Le personnel fréquentant le site est une population adulte (de 20 à 60 ans) et, le cas échéant, averti des risques existants. Les voies d'expositions sont les suivantes : l'ingestion de sédiment, le contact cutané, l'inhalation de particules, l'inhalation de vapeur.
- Les riverains et les usagers ou les visiteurs du site (population adulte et enfants) qui peuvent être en contact avec les sédiments via des activités récréatives (promenade, baignade, pêche, pique nique, activité sportive,...) ou par la consommation de végétaux ou d'animaux cultivés sur des terrains ayant accueilli des sédiments curés. Les voies d'exposition directes sont : l'ingestion de sédiments, le contact cutané, l'inhalation de poussières et de vapeur.

4.3.3. Identification des voies de transfert

On recensera les voies de transfert possibles entre le milieu et ses composantes (sol, soussol, eaux souterraines, eaux superficielles, air, faune, flore) et l'homme.

Le schéma initial pourra aider à la sélection des voies de transfert et d'exposition.

Des exemples des différentes voies de transfert retenues dans le cadre de l'Etude Détaillée des Risques pour le contexte « Devenir des sédiments extraits » sont présentés Tableau 7.

Tableau 7. : Situation devenir des sédiments extraits - voies de transfert

Cibles intermédiaires	Modes de transfert
Eaux superficielles	Solubilisation et entraînement par les eaux de ruissellement
Eaux souterraines	Solubilisation et migration des polluants vers la nappe phréatique et/ou infiltration des eaux de ruissellement polluées
Flore	Adsorption des polluants contenus dans la matrice des sédiments et dans l'eau intersticielle, bio-accumulation des polluants biodisponibles.
Faune	Ingestion de végétaux contaminés, adsorption et/ou ingestion des micro-polluants, bio-accumulation
Air	Envol de poussières après ressuyage des sédiments, émanation de gaz de fermentation, aérosols

Les voies d'exposition possibles entre les sources et l'homme sont reprises dans le schéma conceptuel (Cf 3.4.4).

4.3.4. Schéma conceptuel

A partir des données recueillies, le schéma conceptuel permet de résumer les voies de transfert des polluants identifiés dans les différentes matrices vers les populations cibles.

Les voies d'exposition des polluants qu'il convient de retenir sont : l'inhalation, l'ingestion, le contact cutané. En fonction du compartiment environnemental, on distinguera les voies d'exposition suivantes :

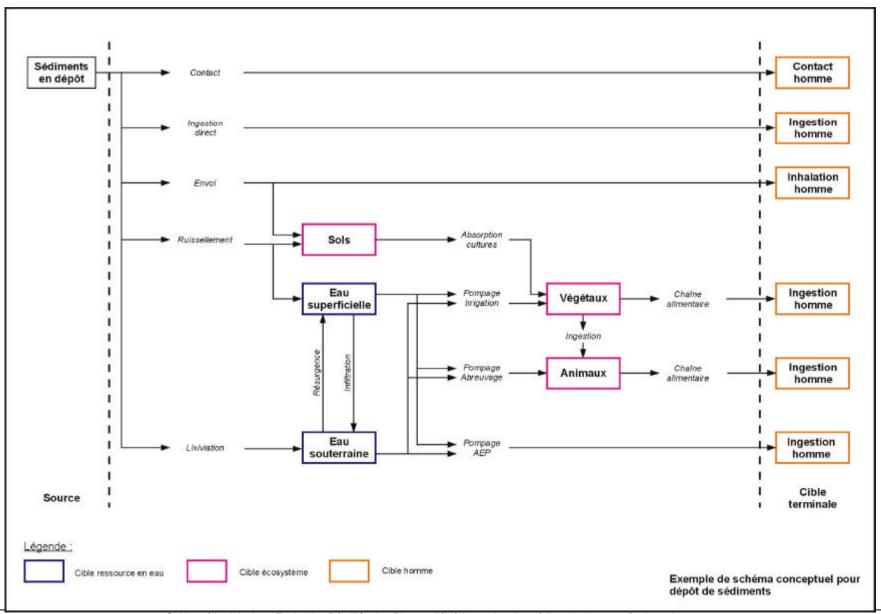
- ? Ingestion directe de sédiments,
- ? Ingestion d'aliments d'origine végétale,
- ? Ingestion d'aliments d'origine animale à partir d'animaux élevés ou pêchés sur ou à proximité du site,
- ? Ingestion d'eaux contaminées,
- ? Contact cutané avec les sédiments,
- ? Contact cutané avec l'eau superficielle ou souterraine,
- ? Inhalation de polluants sous forme gazeuse,
- ? Inhalation de polluants adsorbés sur les poussières...

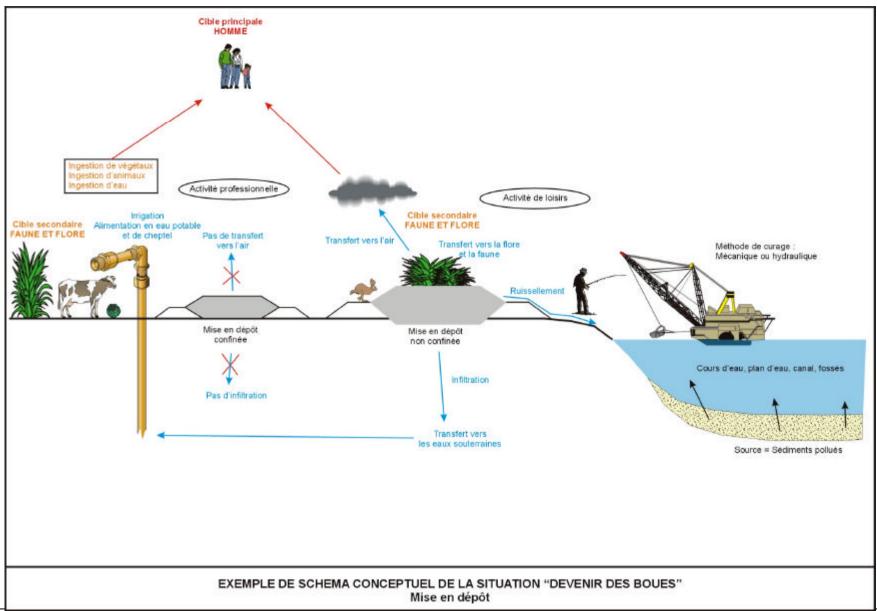
Ces voies d'exposition seront ensuite assemblées pour construire les scénarii d'exposition de chaque cible.

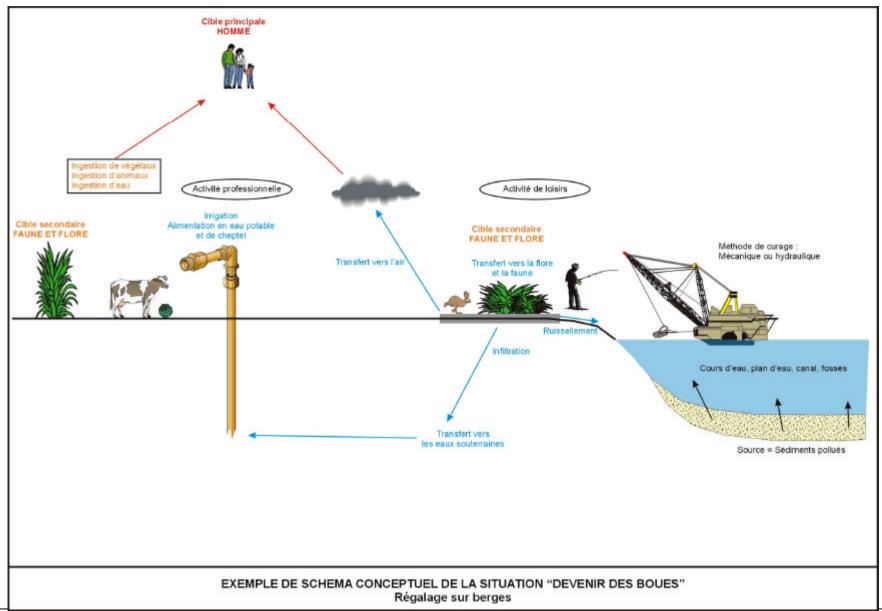
Un tableau récapitulatif en fonction des catégories de populations cibles sera établi par l'évaluateur, ainsi qu'un schéma conceptuel appliqué au cas traité. Un exemple de schéma conceptuel pour le devenir des sédiments est donné en page suivante.

4.3.5. Gestion des risques

Le devenir sera choisi pour limiter les risques de détérioration du milieu. Les techniques retenues seront détaillées en prenant en compte leur influence sur les cibles potentielles identifiées.







5. CAHIER DES CHARGES TYPE ET GRILLES DE LECTURE

5.1. Cahier des charges type

Un cahier des charges type pour une évaluation détaillée des risques pour la santé humaine liés à la gestion des sédiments et aux opérations de curage est proposé en Annexe 3A.

Il prend en compte la majorité des situations qui peuvent être envisagées. Ainsi, sur la base du cahier des charges "type" proposé, rédigé sous un format Word, le Maître d'Ouvrage pourra rédiger l'appel d'offre correspondant à sa ou ses situations à étudier en procédant de la façon suivante :

compléter les objectifs de l'étude, le contexte socio-économique, géographique, et environnemental, l'usage actuel et/ou futur du site. Il suffit de sélectionner les zones colorées en bleu et de les remplacer par le texte adapté au site étudié.

définir une stratégie d'échantillonnages si nécessaire.

supprimer les situations, les voies d'exposition qui ne sont pas adaptées au cas étudié.

apporter toute information complémentaire relative au site (existence d'études de diagnostic, d'études d'impact, ...). Ces informations devront être résumées dans le cahier des charges d'appel d'offre, et les études listées. Elle pourront être consultées par les entreprises répondant à l'appel d'offres.

Ce cahier des charges propose également la rédaction d'articles relatifs à l'organisation de l'étude, et aux conditions financières. Le Maître d'Ouvrage pourra, s'il le souhaite, scinder ce document en deux parties : une partie technique et une partie administrative.

5.2. Grilles de lecture

Deux grilles de lecture sont proposées en Annexe 3B et 3C :

Annexe 3B : Grille de lecture pour validation de l'EDR : Cette grille de lecture s'adresse au Maître d'Ouvrage et au bureau d'étude qui réalisera l'évaluation. Elle a pour objectif d'aider à la lecture de l'étude et de la valider par rapport à la démarche proposée dans le guide. Elle permettra également au Maître d'Ouvrage de juger de la qualité de l'étude.

Annexe 3C : Grille de lecture pour les réponses au cahier des charges : Cette grille de lecture s'adresse au Maître d'Ouvrage. Elle a pour objectif de l'aider au dépouillement des offres et au choix du futur prestataire.

GLOSSAIRE

- **ABSORPTION :** Pénétration d'une substance à travers une barrière d'échange (cf. barrières d'échange) avec l'organisme.
- **ADSORPTION :** Phénomène consistant en la fixation de molécules ou d'ions a la surface de corps solides
- **ANALYSE DE SENSIBILITE:** Analyse ayant pour but de quantifier, dans un modèle, l'influence des variables d'entrée sur la variable de sortie. L'analyse consiste à étudier la variation des résultats selon les fluctuations de la valeur d'une variable d'entrée, en laissant les autres paramètres inchangés. La sensibilité des résultats est analysée pour les variables d'entrée ayant le plus d'influence sur le résultat.
- **BARRIERES (D'ECHANGE) DE L'ORGANISME :** Zones d'échange entre l'organisme et le milieu extérieur (la paroi intestinale, les alvéoles pulmonaires et la peau).
- **BIOACCUMULATION:** Processus d'accumulation d'une substance dans toute ou partie d'un organisme vivant, via la chaîne alimentaire ou un écosystème. Processus d'échange entre un être vivant et son milieu, entraînant des concentrations plus élevées à l'intérieur de cet organisme que dans son environnement ou son alimentation.
- **BIODISPONIBILITE:** Aptitude d'une substance présente dans l'environnement à être prélevée et absorbée par un organisme vivant et disponibilité pour interagir avec les processus métaboliques de cet organisme.
- **BIOTURBATION :** Phénomène par lequel des organismes aquatiques inféodés au milieu benthique mettent en suspension dans l'eau, par leur activité de déplacement ou de fouissage, des particules de sédiment. (F. RAMADE)
- **BRUIT DE FOND :** Concentration représentative ambiante en un élément, en un composé, ou en une substance dans un milieu donné. Elle tient compte des concentrations naturelles (fond géochimique naturel) et de celles provenant éventuellement de sources d'origine anthropique autres que celles du site étudié (exemple : pollution diffuse par engrais, pesticides, ...).
- **CANCÉRIGÈNE :** Se dit de tout facteur, chimique, physique ou biologique, susceptible de provoquer ou de favoriser l'apparition d'un cancer.
- **CIBLE :** Récepteur physique ou environnemental : espèce vivante (homme, faune, flore), ressources en eau, ou biens matériels exposés aux effets d'un danger, direct ou indirect, ou soumise à un risque.
- **CHIRONOME :** Diptère qui se reproduit dans les étangs et mares stagnantes. Ses larves vivent dans les sédiments au fond de l'eau.

COEFFICIENT DE PARTAGE CARBONE ORGANIQUE - EAU : Voir KOC

COEFFICIENT DE PARTAGE OCTANOL - EAU : Voir KOW.

COEFFICIENT DE PARTAGE SOLIDE - LIQUIDE : Voir KP

- **CONFINEMENT SECURITAIRE**: Structure physique ayant pour objectif de rompre les possibilités de transfert des polluants. Exemples : couverture étanche, paroi au coulis,...
- **COMPARTIMENT:** Subdivision de l'environnement (synonyme : milieu). Exemples : air, eau, sol, faune, flore,...).
- **COMPARTIMENT D'EXPOSITION:** Compartiment avec lequel la cible considérée a un contact direct. Exemples: air extérieur, air de l'habitation, eau d'alimentation, eau du lieu de baignade, parties comestibles des fruits et légumes consommés.
- **CONTACT (DERMIQUE):** Relation directe entre une substance et la peau.
- **CONTAMINATION :** Présence anormale d'une substance, de micro-organismes dans un milieu, un objet, ou un être vivant. La notion de contamination est appliquée historiquement et dans l'ordre aux micro-organismes, puis aux substances radioactives.
- **CURAGE :** Enlèvement des dépôts de sédiment dans un milieu aquatique (fossé, rivière, bassin...). « Tous travaux nécessaires pour rétablir un cours d'eau dans sa largeur et sa profondeur naturelles » (article 144 du Code Rural)
- **DANGER :** Situation ou possibilité pour une substance, du fait de ses caractéristiques ou propriétés intrinsèques, de provoquer des dommages aux personnes, aux biens, à l'environnement, dans des conditions déterminées d'exposition.
- **DEROCTAGE (OU DEROCHAGE) :** Enlèvement des roches dans un plan d'eau ou sur les berges (par extension, élargissement d'un canal).
- **DIATOMEES :** Algues brunes microscopiques unicellulaires, marines ou lacustres, enfermées dans une coque siliceuse. Utilisées pour des test de la qualité hydrobiologique des eaux de surface par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie.
- **DOSE**: Quantité de substance absorbée par un organisme exposé.
- **DOSE REPONSE :** Relation entre la dose absorbée et l'incidence et la gravité des effets. Egalement appelée dose-effet.
- **DOSE ABSORBEE :** Quantité de substance ayant pénétré les barrières de l'organisme suite à un contact. La dose absorbée correspond à la dose interne.
- **DOSE ADMINISTREE :** Quantité de substance mise en contact avec les barrières de l'organisme (parois intestinales, alvéoles pulmonaires, peau).
- **DOSE INTERNE:** voir dose absorbée.
- **DOSE JOURNALIÈRE ADMISSIBLE (DJA):** Quantité de substance chimique que peut ingérer un homme ou un animal, par jour, au cours de leur vie, sans qu'il en résulte un risque appréciable pour leur santé.
- **DOSE JOURNALIERE D'EXPOSITION :** Dose (interne ou externe) de substance reçue par l'organisme rapportée au poids de l'individu et au nombre de jours d'exposition (dans le cas d'une substance ayant des effets à seuil) et au nombre de jours de la vie entière (dans le cas d'une substance ayant des effets sans seuil).

- DOSE JOURNALIÈRE TOLÉRABLE (DJT): Estimation de la quantité d'une substance présente dans les aliments ou l'eau de boisson, exprimée en fonction du poids corporel (mg/kg ou µg/kg de poids corporel), qui peut être intégrée journalièrement pendant toute la vie sans risque appréciable pour la santé. Expression préférable du point de vue de l'OMS, car s'agissant d'une dose permise plutôt qu'acceptable.
- **DOSE REÇUE :** voir dose administrée.
- **DRAGAGE :** Variante du curage qui consiste à extraire le sédiment avec une drague (mécanique : à godets, à bennes preneuses, à cuiller... ou hydrauliques : dragues suceuses ou pneumatiques...)
- **EAUX DE SURFACE:** eaux douces superficielles (toutes les eaux stagnantes et les eaux courantes à la surface du sol en amont de la limite des eaux douces), estuaires (zone de transition à l'embouchure d'un fleuve entre les eaux douces et les eaux côtières) et eaux côtières (eaux situées en deçà d'une ligne dont tout point est situé à une distance d'un mille marin au delà du point le plus proche de la ligne de base servant pour la mesure de la largeur des eaux territoriales et qui s'étendent, dans le cas des cours d'eau, jusqu'à la limite extérieure de l'estuaire, le cas échéant) - (proposition de directive cadre sur l'eau - projet COM 97-49 du 26 février 1997)
- **EAUX SOUTERRAINES:** toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol dans la zone de saturation qui sont en contact direct avec le sol (proposition de directive cadre sur l'eau - projet COM 97-49 du 26 février 1997)
- **ÉCHANTILLON:** Quantité de matière sur laquelle les observations faites peuvent fournir des données sur le milieu dans lequel l'échantillon a été prélevé.
- **ÉCOSYSTÈME :** Unité écologique de base formée par le biotope et les organismes y vivant (animaux, homme, micro - organismes, plantes).
- EFFET SECONDAIRE: Tout effet, néfaste ou bénéfique, immédiat ou tardif, qui vient s'ajouter aux effets que l'on désire obtenir en utilisant un produit.
- **EFFET SYSTEMIQUE:** Effet qui apparaît en un site distant du point d'entrée dans l'organisme et qui nécessite une absorption et une distribution de la substance dans l'organisme.
- **ELINDE :** Bras articulé, équipant dragues flottantes, les et supportant les têtes de désagrégation des sédiments.
- **EVALUATION DES RISQUES:** Processus qui comprend l'identification du potentiel dangereux des substances, l'évaluation de la relation dose-effet, l'évaluation de l'exposition et la caractérisation des risques.
- EXCES DE RISQUE INDIVIDUEL (ERI): Probabilité pour un individu exposé de développer la maladie considérée du fait de l'exposition à la source de substances étudiées.
- **EXCES DE RISQUE UNITAIRE (ERU) :** Probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu a de contracter un effet sans seuil s'il est exposé toute sa vie à une unité de dose de toxique. On distingue l'ERU (unité en (mg/Kg/j)) pour la

voie d'administration orale de l'ERUI (unité en (mg/m) pour la voie d'administration respiratoire.

- **EXPOSITION :** Contact d'une cible avec un agent chimique ou physique pendant une certaine période. L'exposition est quantifiée par la quantité de substance entrant en contact avec les barrières d'échange de l'organisme et disponible pour une éventuelle absorption.
- **EVALUATION DE L'EXPOSITION :** Evaluation des voies de transfert et des vitesses de déplacement d'une substance et de sa transformation ou de sa dégradation, afin d'évaluer les concentrations ou doses auxquelles les cibles sont exposées ou susceptibles de l'être.
- **EXPOSITION AIGUÉ:** Exposition de courte durée (de quelques secondes à quelques jours).
- **EXPOSITION CHRONIQUE:** Exposition persistante, continue ou discontinue, se produisant sur une longue période (plusieurs années à la vie entière).
- **EXPOSITION SUBCHRONIQUE:** Exposition de durée intermédiaire entre une exposition aiguë et une exposition chronique (se rapporte à une période de vie comprise entre quelques jours et quelques années).
- **IMPACT :** Effet d'une action, d'un aménagement, d'une exploitation de matière première, sur un milieu naturel, des organismes, un écosystème, des paysages, ...
- **INACCEPTABLE (RISQUE JUGE) :** Se rapporte au niveau de risque à ne pas dépasser.
- **INDICE DE RISQUE :** Rapport entre la dose journalière d'exposition et la dose journalière admissible. Un indice supérieur à 1 indique la possibilité de survenue d'un effet toxique.

INGESTION: Mode d'exposition par voie orale.

INHALATION: Mode d'exposition par les voies respiratoires.

- Koc (COEFFICIENT DE PARTAGE AVEC LE CARBONE ORGANIQUE): Rapport entre la quantité adsorbée d'un composé par unité de poids de carbone organique du sol ou du sédiment et la concentration en ce même composé en solution aqueuse à l'équilibre. La tendance d'un composé à s'adsorber sur un sol dépend de ses propriétés physicochimiques et de la teneur en carbone organique du sol ou du sédiment. Koc peut être utilisé pour déterminer la répartition d'un composé entre l'eau et le solide.
- Kow (COEFFICIENT DE PARTAGE OCTANOL / EAU (Water)): Rapport entre la concentration d'une substance dans une phase octanol et sa concentration dans une phase aqueuse à l'équilibre. Ce coefficient permet d'indiquer l'affinité d'une substance entre les phases organique et aqueuse. Il reflète la propension des substances à s'adsorber sur la matière organique présente dans les sols. Il est utilisé pour estimer, de façon indirecte, la sorption d'une substance organique dans un sol ou le facteur de bioconcentration.
- **Kp (ou Kd) (COEFFICIENT DE PARTAGE EAU / SOLIDE):** Rapport entre la concentration d'une substance dans un substrat solide (sol, sédiment, ...) et sa

- concentration résiduelle dans la phase aqueuse. Ce coefficient est un indicateur des capacités d'adsorption des dites substances sur des substrats solides. Il est généralement utilisé pour quantifier la sorption sur les sols, les sédiments ou les particules en suspension. L'intensité de cette sorption dépend des propriétés de l'élément étudié et de celles du sol.
- **LESSIVAGE :** Entraînement par l'eau à travers les horizons de sols des substances fixées sur des particules fines.
- **LIMITE DE DETECTION (MÉTHODE):** Plus basse concentration d'un élément ou d'une substance décelable pour une méthode et une matrice données.
- **LIXIVIATION :** Dissolution et entraînement de substances d'un solide complexe sous l'action d'un solvant (exemple : eau à travers les horizons d'un sol).
- **LOAEL (Lowest Observed Adverse Effect Level) :** Niveau (dose) le plus bas, dans une expérience, produisant un effet néfaste observé. **Equivalent français : DMEIO :** Dose Minimale ayant un Effet Indésirable Observé.
- **LOEC (Lowest Observed Effect Concentration) :** Plus petite concentration, dans une expérience, induisant un effet observé.
- **MAITRE D'ŒUVRE :** Personne physique ou morale assurant la conception, le contrôle de la construction et la réception d'un ouvrage conformément aux vœux du Maître d'Ouvrage.
- **MAITRE D'OUVRAGE :** Personne physique ou morale propriétaire actuel ou futur d'un bien meuble ou immeuble assurant le règlement du coût de la construction d'un ouvrage ou de sa modification conformément à ses vœux.
- **MEILLEURE TECHNIQUE DISPONIBLE (MTD):** Stade de développement le plus récent des activités, des procédés et de leur mode d'exploitation, pouvant être employées sur un site à une échelle industrielle, dans des conditions économiquement viables, et permettant d'obtenir un niveau général élevé de protection de l'environnement dans son ensemble.
- **MILIEU:** Air, sol, eau et biote (faune, flore et micro-organismes).
- **MOBILITÉ:** Aptitude d'une substance ou de particules à migrer, soit sous l'action de la gravité, soit sous l'influence de forces locales.
- **MODELE :** Représentation mathématique d'un phénomène physique, chimique, biologique,...
- **MUTAGÈNE :** Se dit de tout facteur, physique, chimique, susceptible de provoquer des modifications génétiques chez les organismes vivants.
- **NAPPE (D'EAU SOUTERRAINE):** eaux souterraines remplissant entièrement les pores d'un terrain perméable (aquifère) de telle sorte qu'il y ait toujours liaison par l'eau entre les pores ; la nappe s'oppose à la zone non saturée sus jacente ; une nappe peut recevoir différents qualificatifs relatifs à son gisement (nappe alluviale, ...), à ses conditions hydrodynamiques (nappe captive ou libre, artésienne, ...), ou à des caractéristiques de l'eau (nappe salée ou thermale, ...).

- **NEOSOL :** C'est un sol en voie de formation au sens chimique du terme. Les composantes chimiques et organiques du sédiment extrait ne sont pas à l'équilibre avec le milieu « aérien ». Il s'en suit un processus de transformation (plus ou moins lent) jusqu'à obtenir un sol ayant des caractéristiques pédologiques et agronomiques spécifiques.
- **NOAEL (No Observed Adverse Effect Level):** Niveau (dose) le plus élevé, dans une expérience, ne produisant pas d'effet néfaste observé. Equivalent français: DSEIO Dose Sans Effet Indésirable Observé.
- **OLIGOCHETES :** Animaux de la classe des annélidés (ex : ver de terre) utilisés pour étudier la toxicité des sédiments (indice IOBS).
- PARAMÈTRE: Propriété mesurée ou observée.
- **PERMÉABILITÉ:** Aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'action d'un gradient hydraulique (différence de charge hydraulique entre deux points d'un aquifère par unité de distance, selon une direction donnée); cette perméabilité se traduira soit par une vitesse d'infiltration, soit par un coefficient de perméabilité à l'eau; ce coefficient dépend notamment de l'état de saturation en eau du milieu; la perméabilité s'exprime en volume d'eau par unité de temps et par unité de surface, mais aussi usuellement par unité de vitesse.
- **PERSISTANCE :** Propriété que possède un xénobiotique à demeurer présent dans l'environnement. Elle peut se mesurer par la durée nécessaire pour obtenir une dégradation complète ou partielle (cf. demi vie).
- **PIÉZOMÈTRE :** Dispositif servant à mesurer une hauteur piézométrique en un point donné de l'aquifère, qui indique la pression en ce point ; il permet l'observation ou l'enregistrement d'un niveau d'eau libre ou d'une pression.
- **POINT D'EXPOSITION:** Lieu de contact entre une substance et la cible. Le point d'exposition appartient à un compartiment d'exposition.
- **POLLUANT :** Produit, substance ou composé chimique présent dans un milieu. On distingue les polluants primaires, rejetés directement dans le milieu naturel, des polluants secondaires qui proviennent de réactions sur les premiers, ou entre eux.
- **RECEPTEUR:** Organisme vivant potentiellement exposé à une substance. Synonyme de cible.
- **RESSUYAGE**: Drainage naturel des sédiments aéré par migration de l'eau en excès.
- **RISQUE:** Probabilité qu'un effet indésirable se réalise dans des conditions d'exposition données.
- **RUISSELLEMENT :** Partie des précipitations atmosphériques (pluie, neige) qui s'écoule à la surface du sol et des versants.
- **SCENARIO D'EXPOSITION:** Ensemble des activités d'un individu et des conditions de réalisations de ces activités pouvant conduire à une exposition.
- **SEDIMENT :** Particule solide déposée au fond d'un plan ou d'un cours d'eau.

- **SENSIBILITE (POPULATIONS, CIBLES):** Aptitude d'un organisme à réagir à des excitations externes, en l'occurrence à une exposition directe (présence sur le site ou aux alentours immédiats) ou indirecte (consommation d'eau en provenance d'une alimentation contaminée, consommation d'aliments contaminés, pratique de sports aquatiques, ...).
 - Sont considérées comme populations sensibles les nourrissons et enfants, les femmes enceintes, les personnes âgées, les malades.
- **SORPTION :** Terme générique incluant l'absorption, l'adsorption, la désorption et l'échange d'ions ; la sorption est le processus majeur de subsurface affectant le devenir et le transport des polluants dans l'environnement.
- **SPÉCIATION:** Définition de la forme chimique ou de la phase porteuse, dans laquelle se trouve un élément (forme ionique, structure moléculaire, association physique, support minéral ou organique).
- **TÉRATOGÈNE :** Se dit d'un agent susceptible de produire des malformations au cours du développement embryonnaire.
- **TOXICITÉ:** Propriété d'une substance chimique introduite dans un organisme, d'engendrer, temporairement ou non, des troubles de certaines fonctions. La toxicité peut être la conséquence de divers phénomènes:
 - ? par cumul de doses liées à des composés stables et rémanents (métaux lourds, pesticides chlorés, fluorures, ...),
 - ? par sommation des effets liés à des produits métabolisés par l'organisme,
 - ? toxicité immunoallergique liée à la sensibilité propre au sujet, sans qu'il y ait une relation entre la dose et l'effet.
 - On distingue la toxicité aiguë (causant la mort ou des désordres physiologiques importants immédiatement ou peu de temps après l'exposition), subaiguë (effets dus à des doses plus faibles, se produisant à court terme, sur des organes cibles, parfois réversibles), ou chronique (causant des effets irréversibles à long terme par une absorption continue de petites doses de polluants, ou des effets cumulatifs).
- **TOXICOLOGIE:** Science ayant pour objet l'identification et l'étude des substances susceptibles de nuire aux organismes vivants.
- **TOXIQUE VIS-A-VIS DE LA REPRODUCTION :** Toute substance ou préparation qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peut produire ou augmenter la fréquence d'effets indésirables non héréditaires dans la progéniture ou porter atteinte aux fonctions ou capacités reproductives.
- **TRANSFERT :** Migration de substances dissoutes ou non à l'intérieur d'un sol, à travers ou à sa surface, causée par l'eau, l'air et les activités humaines, ou bien par les organismes du sol.

"USAGE" DE L'EAU:

- ? le captage, la distribution et la consommation d'eau de surface ou d'eau souterraine,
- ? toute autre utilisation d'eau de surface ou souterraine susceptible d'influer de manière sensible sur l'état écologique des eaux.
- (issu de la proposition de directive cadre sur l'eau projet COM 97-49 du 26 février 1997).

- **USAGE (D'UN SITE):** Emploi, utilisation d'un bien meuble ou immeuble, d'un milieu pour satisfaire un besoin, une fonction, un service.
- **VECTEUR (DE POLLUTION) :** Milieu, organisme, support physique minéral ou organique, liquide, solide ou gazeux, susceptible de transmettre un élément polluant ou infectieux vers une cible à partir d'une source de pollution, par des processus de transport identifiés.
- **VOIE D'ADMINISTRATION :** Voie par laquelle la substance pénètre dans l'organisme. On distingue trois types : l'inhalation, l'ingestion et le contact cutané qui peuvent être différenciés en fonction du milieu de transfert concerné :
 - ? inhalation d'une substance sous forme gazeuse ou adsorbé sur des poussières, ou de vapeur d'eau contaminée,
 - ? ingestion directe de sol, d'aliments (végétaux cultivés sur le site, animaux élevés sur le site), d'eau contaminée,
 - ? absorption cutanée par contact avec un sol, des poussières et /ou de l'eau (bain, douche, activités nautiques, ...) contaminés .
- **VOIE D'EXPOSITION :** Voie de passage d'une substance de la source vers une cible. Une voie d'exposition inclut une source, un point d'exposition et une voie d'administration. Si le point d'exposition diffère de la source, il existe également un mécanisme de propagation et un compartiment intermédiaire où le polluant est transporté.
- **VOLATILITÉ**: Aptitude d'une substance à s'évaporer, généralement mesurée par la tension de vapeur.
- **VULNÉRABILITÉ :** Aptitude d'un milieu, d'un bien, d'une personne à subir un dommage à la suite d'un événement, naturel ou anthropique.
- **VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES:** ensemble des caractéristiques d'un aquifère qui détermine la plus ou moins grande facilité d'accès à ce réservoir et de propagation dans celui-ci d'une substance considérée comme indésirable.
- **XÉNOBIOTIQUE:** Substance possédant des propriétés toxiques, même lorsqu'elle est présente dans le milieu à de très faibles concentrations.

BIBLIOGRAPHIE

- ? loi N°95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de la nature, dite Loi Barnier
- ? Gestion des sites pollués Diagnostic approfondi Evaluation détaillée des risques BRGM / INERIS / Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement Version 0 Editions BRGM Juin 2000
- ? Curage et devenir des boues Approche réglementaire Octobre 1997 Agence de l'Eau / Service Navigation Nord Pas de Calais / DIREN Nord Pas de Calais
- ? Guide méthodologique Faut-il curer ? pour une aide à la prise de décision Version 1 Avril 1998 Groupe de travail opérationnel de la thématique « sédiments pollués » du Pôle de compétence sur les sols et sédiments pollués. Disponible sur le site internet : http://www.eau.artois.picardie.fr
- ? SIADO / Scarpe Moyenne / Etude détaillée des risques Rapport final Juin 1999 Réalisation TAUW Environnement SAS Maîtrise d'Ouvrage SIADO
- ? Etude de risques pour la santé humaine liés au projet d'aménagement en aire récréative du terrain de dépôt n°6 des Voies Navigables de France à Deulémont (Nord). - Dames & Moore - mars-98
- ? Etude de diagnostic sur 3 sites des dépôts de curage sur le domaine des Voies Navigables du Nord - Pas de Calais (Voies Navigables de France) - Dames & Moore septembre-99

ANNEXE 1 : METHODOLOGIE D'ETUDE DETAILLEE DES RISQUES

L'annexe 1 fournit des informations complémentaires et des recommandations pour la réalisation d'une évaluation détaillée des risques :

- ? l'annexe 1A fournit des recommandations pour la caractérisation des sources et des polluants
- ? l'annexe 1B fournit des recommandations pour l'analyse des transferts.

ANNEXE 1A: RECOMMANDATIONS POUR LA CARACTERISATION DE LA SOURCE ET DES POLLUANTS

Le terme source doit être caractérisé du point de vue chimique, physique et toxicologique.

1A-1 Caractérisation chimique

Les sédiments peuvent être une source de pollution du fait de la présence de substances indésirables. La nature des ces substances peut être identifiée par une recherche historique de l'utilisation du cours d'eau et des activités potentiellement polluantes à proximité du plan ou du cours d'eau. Les sédiments des cours d'eau ont pu au cours du temps accumuler des polluants rejetés dans l'environnement et en particulier dans les eaux de surface.

La réalisation d'un historique exhaustif est cependant délicate. Des analyses chimiques de la phase solide et de la phase liquide des sédiments sont envisageables permettant un large balayage de substances en l'absence d'information précise sur la natures des polluants potentiellement présents.

Les paramètres recherchés lors des analyses peuvent être les suivants (liste non exhaustive donnée à titre d'exemple) :

- ? PH:
- ? Potentiel rédox ;
- ? Carbone organique total et/ ou fraction de matière organique ;
- ? Azote organique ;
- ? Phosphore;
- ? Oxydes de métaux, en particulier les oxydes de fer et de manganèse ;
- ? Sulfures, et autres formes soufrées ;
- ? Teneur en carbonates ;
- ? Micro-polluants métalliques et métalloïdes : arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb, sélénium, zinc, etc.
- ? Polluants organiques : hydrocarbures aromatiques polycycliques, phénols, composés halogénés, polychlorobiphényles, hexachlorocyclohexanes, hydrocarbures aliphatiques.

La liste des composés est à adapter en fonction de la situation examinée.

Le choix des composés recherchés sera expliqué dans l'étude et il pourra être revu à mesure de l'avancement des études.

Dans un premier temps, on pourra réaliser des analyses de quantification globale des composés sans distinction de leur spéciation. Des analyses plus approfondies pourront ensuite être envisagées pour caractériser les formes chimiques précises ou les degrés d'oxydation des éléments chimiques (spéciation des métaux par exemple) afin d'affiner l'étude de risque.

Les critères de sélection des substances à analyser peuvent être les suivants :

- ? la présence constatée de la substance lors d'analyses antérieures ;
- ? la mobilité de la substance (solubilité et volatilité, par exemple) : plus une substance est mobilisable, plus son transfert est probable, et plus elle risque d'atteindre la cible ;
- ? la toxicité de la substance et la relation dose–effet, qui reflètent le danger potentiel lié à la substance.

Le Tableau 1 dans le texte du guide est un exemple de présentation permettant de guider le choix des substances à prendre en compte dans l'évaluation détaillée des risques.

Les paramètres caractérisant la mobilité des substances présentes dans la source sont :

- ? La solubilité dans l'eau (aptitude à se dissoudre dans l'eau) ;
- ? La constante de Henry (évaporation d'un composé en solution dans l'eau (volatilité)) ;
- ? Le coefficient de partage eau-octanol (partage entre une phase aqueuse et une phase huileuse (hydrophobicité));
- La constante d'adsorption (partage d'un composé entre la phase solide et la phase liquide qui se rapporte à la teneur en carbone);
- ? La durée de demi-vie (persistance dans l'environnement).
- ? La pression de vapeur saturante (évaporation d'un composé pur (volatilité)) ;

1A-2 Caractérisation physique

Certaines propriétés physiques des sédiments (source) contribuent également au potentiel de mobilisation des substances indésirables présentes. Il s'agit notamment de :

- ? la granulométrie, en particulier la fraction de « fines » (argiles) ayant des propriétés d'adsorption particulières, vis-à-vis des métaux notamment ;
- ? la porosité :
- ? la perméabilité;
- ? la dynamique de sédimentation ;
- ? la température ;
- ? la siccité...

1A-3 Caractérisation toxicologique

1A-3.1 Toxicité d'une substance

La toxicité d'une substance est retranscrite au travers de valeurs toxicologiques de référence (ERU et DJA ou DJT).

Les effets associés à une substance ou à un mélange de substances peuvent être de nature suivante :

? **les effets toxiques systémiques** touchent tous les organes ou un organe non directement exposé,

- ? **les effets toxiques locaux**, par opposition, ne touchent que la région du corps ou l'organe directement exposés à la substance ;
- ? les effets cancérigènes peuvent conduire à l'apparition d'un cancer ;
- ? **les effets mutagènes** sont susceptibles de provoquer des mutations chez les êtres vivants :
- ? les effets sur la reproduction et le développement ;
- ? **les effets tératogènes** peuvent conduire à des malformations congénitales lors du développement du fœtus.

1A-3.2 Quantification des effets

La quantification de la toxicité consiste à établir un lien entre la dose absorbée ou administrée et l'effet consécutif au niveau de l'organisme.

On distingue dans ce cadre:

- ? les **effets à seuil**, et
- ? les **effets sans seuil**

? Les effets à seuil

Pour ces effets, les substances provoquent des effets à partir d'une certaine dose d'exposition. Une exposition au-dessous de cette dose n'entraîne pas de risque pour la cible exposée. Les Doses Journalières Tolérables (DJT) encore appelées Doses Journalières Admissibles (DJA) correspondent aux niveaux d'exposition sans risque appréciable pour l'homme. Ces valeurs sont disponibles dans les bases de données et devront être intégrées dans l'évaluation détaillée des risques pour les substances avec effets à seuil.

Les doses journalières sont établies par différents organismes et peuvent de ce fait varier pour une même substance selon l'organisme. Elles ont souvent plusieurs dénominations : on peut citer en exemple l'US EPA (US Environmental Protection Agency) et l'ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) :

Tableau 1A-1. : Terminologie relative aux doses journalières

	voie orale	voie respiratoire
Dénomination française	DJT ou DJA	DJT ou DJA
Dénomination de l'US EPA	RfD : Reference Dose	RfC : Reference Concentration
Lienomination de l'Alsilk	MRL : Maximum Reasonable Level	

La fiabilité des données entre également en ligne de compte ; cependant un effet qui n'a pas été mis en évidence peut exister, mais peut n'avoir pas été détecté pour diverses raisons (effectifs testés insuffisants, effet masqué).

? Les effets sans seuil

Pour ces effets, un risque existe quelle que soit la dose d'exposition. D'une manière générale, les substances à effets sans seuil sont les substances cancérigènes, mutagènes

ou tératogènes. Les substances cancérigènes non génotoxiques (qui n'agissent pas sur le génome) sont néanmoins à l'heure actuelle au centre de débats concernant l'existence ou non d'un seuil de toxicité. Certains pays européens ont défini des seuils pour caractériser ces effets, tandis que l'US EPA considère ce type d'effet sans seuil. L'approche du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement en France est de considérer cet effet sans seuil, en application du principe de précaution.

Pour les substances cancérigènes, des classifications des substances selon leur potentiel dangereux ont été établies par différents organismes (US EPA, Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC ou IARC) et Union Européenne).

La classification de l'US EPA prend en compte toutes les données humaines et animales, qu'elles soient positives ou négatives, et distingue 6 classes :

Tableau 1A-2. : Classification de l'US EPA des substances cancérigènes

Classe A	Substance cancérigène pour l'homme.
Classe B1	Substance probablement cancérigène pour l'homme. Des données limitées sont disponibles chez l'homme.
Classe B2	Substance probablement cancérigène pour l'homme. Il existe des preuves suffisantes chez l'animal et des preuves non adéquates ou pas de preuve chez l'homme.
Classe C	Substance cancérigène possible pour l'homme.
Classe D	Substance non classable quant à la cancérogénéité pour l'homme.
Classe E	Substance pour laquelle il existe des preuves de non cancérogénéité pour l'homme.

La classification du Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) ne retient que les données positives humaines ou animales et distingue 5 groupes :

Tableau 1A-3. : Classification du CIRC des substances cancérigènes

Groupe 1	Agent cancérigène pour l'homme.
Groupe 2A	Agent probablement cancérigène pour l'homme : indices limités de cancérogénéité chez l'homme et indices suffisants de cancérogénéité chez l'animal de laboratoire.
Groupe 2B	Agent qui pourrait être cancérigène pour l'homme : indices limités de cancérogénéité chez l'homme et indices pas tout à fait suffisants de cancérogénéité chez l'animal de laboratoire.
Groupe 3	Agent ne pouvant être classé pour sa cancérogénéité pour l'homme.
Groupe 4	Agent probablement non cancérigène pour l'homme.

L'Union Européenne (1993) classe les substances en vue de leur étiquetage :

Tableau 1A-4. : Classification de l'Union Européenne des substances cancérigènes

Première catégorie	Substance que l'on sait être cancérigène pour l'homme : on dispose de suffisamment d'éléments pour établir une relation de cause à effet entre l'exposition de l'homme à une telle substance et l'apparition d'un cancer.
Deuxième catégorie	Substance devant être assimilée à une substance cancérigène pour l'homme : on dispose de suffisamment d'éléments pour justifier une forte présomption que l'exposition de l'homme à une telle substance peut provoquer un cancer.
Troisième catégorie	Substance préoccupante pour l'homme en raison d'effets cancérigènes possibles, mais pour laquelle les informations disponibles ne permettent pas une évaluation suffisante.

Dans le cas des substances provoquant des effets sans seuil, les effets sont traduits par une probabilité, appelée **Excès de Risque Unitaire** (ERU). Cet excès de risque unitaire est la probabilité supplémentaire qu'a un individu de développer un effet s'il est exposé à une unité de dose ou de concentration de la substance toxique, par rapport à un sujet non exposé.

L'ERU est généralement déterminé à partir d'études épidémiologiques et d'expérimentations animales. Les niveaux d'exposition applicables à l'animal sont convertis en niveaux d'exposition équivalents pour l'homme à l'aide de facteurs d'ajustement. De plus, les études chez l'animal sont menées pour des doses élevées, afin d'observer plus facilement les effets. Des modèles d'extrapolation hautes doses – basses doses permettent ensuite de dériver le niveau de réponse attendu à des niveaux bas (niveaux de risque faible). L'ERU est la pente de la courbe du risque en fonction de la dose, dans le domaine de risque et de dose faibles. Dans cette zone, l'ERU n'est pas observable expérimentalement.

Dans une démarche sécuritaire, un seul indice ERU est défini quel que soit le type d'individu (population sensible ou non) mais il peut varier selon le modèle utilisé. Il est établi par des groupes de travail compétents en la matière (Organisation Mondiale de la Santé - OMS, US EPA...).

Concrètement, deux types d'indices peuvent être définis :

- ? L'**ERUo** : l'Excès de Risque Unitaire lié à la voie d'exposition orale (oral slope factor dans la terminologie de l'US EPA) exprimé en (mg/kg/j)⁻¹.
- ? L'**ERUi**: l'Excès de Risque Unitaire par inhalation exprimé en (mg/kg/j)⁻¹ (terminologie de l'US EPA: inhalation slope factor exprimé en (mg/kg/j)⁻¹ déterminé à partir d'un air unit risk en (μg/m³)⁻¹).

Ces valeurs sont disponibles dans les bases de données (Tableau 1A-5).

1A-3.3 Recherche des données toxicologiques

Les données toxicologiques (ERU et DJA) sont issues des travaux de groupes de scientifiques experts en toxicologie et donnent lieu à publication. Elles ne sont pas à établir par l'évaluateur qui se reportera aux différentes publications pour la sélection des valeurs à

inclure dans l'évaluation détaillée des risques. Une liste des sources de données pour l'évaluation des risques est fournie au Tableau 1A-5.

Les études produisent des données :

- ? pour l'homme directement à partir d'études effectuées sur l'être humain (études épidémiologiques),
- ? pour les animaux (expérimentations),
- ? dans le cadre d'études in vitro, d'études pharmaco-cinétiques...

∠ Données chez l'homme

Les données établies pour l'homme, lorsqu'elles existent, sont à privilégier pour l'évaluation détaillée des risques sanitaires. Cependant, peu d'études épidémiologiques ont permis de conclure avec certitude à un effet chez l'homme.

Les données toxicologiques pour l'homme sont d'autant plus difficiles à estimer que l'exposition humaine est souvent mal connue. Cette méconnaissance concerne aussi bien la durée d'exposition, les concentrations d'exposition que le temps de latence entre l'exposition et l'effet.

Les co-expositions (expositions à plusieurs composés à la fois) sont également un facteur d'incertitude dans la détermination des données : l'influence des interactions entre les substances dans un mélange en terme d'effets est très difficile à cerner.

D'autre part, la sensibilité humaine varie selon l'âge, le sexe, le mode de vie et l'état de santé des personnes. Ces variations rendent l'interprétation des études et la détermination des données toxicologiques d'autant plus complexes.

∠ Données chez l'animal

Dans le cas où aucune donnée chez l'homme n'est disponible, l'extrapolation de données obtenues chez l'animal peut être envisagée.

Quelques précautions doivent néanmoins être prises. En effet, pour que l'extrapolation soit représentative, les données devront dans la mesure du possible avoir été déterminées pour la même voie d'administration chez l'animal que celle envisagée chez l'homme. Il est également souhaitable de choisir d'extrapoler des données établies par des études incluant plusieurs espèces.

Autres études

D'autres études permettent de déterminer des données toxicologiques :

- ? des <u>tests in vitro</u> tels que le test d'Ames, le test du micronoyau qui permettent d'évaluer le caractère mutagène d'une substance ;
- des études des relations structure-activité qui visent à identifier les conditions dans lesquelles deux molécules proches ont les mêmes types d'action ;
- ? Des études pharmaco-cinétiques qui visent à comprendre les mécanismes d'action des substances.

Il existe ainsi un très grand nombre de données toxicologiques, établies dans des conditions souvent très différentes. De plus, les données évoluent relativement rapidement au gré de l'enrichissement des connaissances en toxicologie, avec l'aboutissement des études en cours.

D'autre part, chaque cas traité est un cas particulier, et même si pour les sédiments, certaines substances sont récurrentes d'un cas à l'autre, il reste difficile de dégager a priori une donnée toxicologique à utiliser.

C'est pourquoi il n'est pas donné dans le guide de liste de données à appliquer. En revanche, le guide fournit des éléments utiles à la sélection des données toxicologiques appliquées au cas étudié parmi les informations disponibles.

Le choix des données reste donc de la responsabilité de l'évaluateur et doit être expliqué dans l'étude. Une liste des sites et bases de données fournissant des données toxicologiques est présentée dans le Tableau 1A-5 ci-dessous.

1A-3.4 Facteurs de sélection des données toxicologiques

La sélection des valeurs toxicologiques sera faite en tenant compte de l'adéquation des données d'exposition et des données toxicologiques:

Il s'agira de vérifier si :

- les données toxicologiques ont été établies pour des durées d'exposition similaires à celles prises en compte dans le cas traité ;
- ? les données toxicologiques sont applicables aux voies d'exposition du cas traité ;
- ? des ajustements liés aux phénomènes d'absorption par l'organisme sont nécessaires.

Adéquation des valeurs toxicologiques aux durées d'exposition

Une valeur de toxicité basée sur des études portant sur des expositions de longue durée (donnée chronique) doit être comparée au niveau journalier d'exposition également défini pour une longue durée (supérieure à quelques années).

Les risques correspondant à des effets avec seuil liés à des expositions de type subchronique devront être évalués en prenant des valeurs toxicologiques subchroniques.

Si aucune valeur toxicologique adéquate n'est disponible, une valeur toxicologique établie pour une plus longue durée que celle considérée dans le cas traité pourra être prise en compte. Ceci reste une approche majorante.

A l'inverse, si une valeur toxicologique disponible est appliquée à un cas où l'exposition est plus longue que la durée pour laquelle la donnée a été établie, l'incertitude supplémentaire devra être mentionnée et prise en compte dans la mesure du possible. Ceci pourra être réalisé au travers d'un facteur d'incertitude supplémentaire. La démarche choisie devra dans tous les cas être clairement présentée et expliquée dans l'étude.

Les risques correspondant à des effets sans seuil doivent être calculés en prenant en compte le niveau journalier d'exposition moyenné sur la vie entière, même si la durée de l'exposition est inférieure.

Tableau 1A-5.: Base de données documentaires ou publications relatives à la toxicité des substances

Organisme producteur ou fournisseur de données	Publications et base de données	Adresse Internet	Service gratuit ou payant
INRS	Fiches INRS établies par produit	www.inrs.fr	payant
CPP : Comité de Prévention des Pollutions		www.environnement.gouv.fr	
Union Européenne	Annexe 1 de la Directive Européenne 67/548 (93/72/CEE) Annexe VI du Journal Officiel de la Communauté Européenne (JOCE L 110 A)		
	Publications du CSHPF et autres publications sous l'autorité	www.sante.gouv.fr/index.htm	
de France) et Ministère chargé de la Santé	du Ministère chargé de la Santé		
Centre Européen de Recherche d'Ispra	ECDIN 1993 : Environmental Chemicals Data and Information Network		
	IUCLID: International Uniform Chemical Information Database		
UBA : Umweltbundesamt	Basisdaten Toxicologie für umweltrelevant Stoffe zur Gefahrenbeurteilung bei Altlasten		
RIVM: Rijksinstituut voor Volksgezondheit en Milieu (national institute of public health and the environment)		www.rivm.nl	
Organisation Mondiale de la Santé	Environmental Health Criteria, série de monographies issues de l'IPCS (International Program on Chemical Safety)	www.who.int/pcs/	payant
US EPA (Environmental Protection Agency)	HEAST: Health Effects Assessments Summary Tables	www.epa.gov	gratuit
	IRIS : Integrated Risk Information System, banque de données factuelle	www.epa.gov/ncea/iris.htm	gratuit
l'ASTDR (Agency for Toxic Substances and Disease registry, Atlanta, GA, USA)	Toxicological Profiles, série de monographies	www.astdr.cdc.gov/atsdrhom e.html	gratuit - CDrom payant
National Library of Medicine (USA)	HSDB : Hazardous Substances Databank, banque de données factuelle et textuelle		
INERIS à la demande du Ministère de l'Environnement.	Fiches établies par produit – En cours de réalisation	www.ineris.com	
CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer) ou IARC (International Agency for Research on Cancer)		www.iarc.fr	
Australian EPA	ToxNet (TOXicology data NETwork)	www.library.adelaide.edu.au/ erc/H/1299044.html	

Le cas des substances provoquant des effets sur la reproduction et le développement devra être traité de façon particulière. En effet, si l'exposition intervient à un moment critique du développement, ces substances peuvent avoir un effet même sur une exposition de courte durée. Les valeurs toxicologiques devront alors être intégrés à des temps d'exposition très courts, de l'ordre de la journée, et non sur des temps moyennés sur une longue période.

Adéquation des valeurs toxicologiques aux voies d'administration des polluants

La toxicité d'une substance n'est pas nécessairement la même en fonction de la voie de passage du polluant dans l'organisme. Le risque est lié à une voie d'administration et il doit être évalué avec des données établies pour cette même voie.

Il peut arriver qu'aucune donnée ne soit disponible pour la voie d'exposition considérée dans le cas traité. Dans ce cas, il est parfois possible d'extrapoler voie à voie les données toxicologiques. Ceci permet de ne pas éluder certaines voies d'exposition donc de ne pas minimiser le risque global évalué.

Les données peuvent ainsi être extrapolées entre voie cutanée et voie orale et entre voie orale et voie respiratoire. Les valeurs établies pour la voie respiratoire sont cependant exprimées sous la forme d'une concentration (en mg/m³). Leur conversion en dose (en mg/kg/j) fait intervenir le taux respiratoire (en m³/j) et le poids corporel (en kg).

L'extrapolation peut parfois s'avérer impossible, notamment lorsque le taux d'absorption de la substance est différent d'une voie à l'autre.

Ajustements liés aux phénomènes d'absorption

Les valeurs toxicologiques et les doses d'exposition estimées doivent se rapporter au même type de dose. En effet, on distingue la dose absorbée et la dose administrée. Si la valeur toxicologique et la dose estimée ne correspondent pas, il faut alors faire intervenir un facteur d'absorption correctif.

? Dans le cas d'une substance à effet à seuil : si la dose d'exposition estimée est une dose absorbée et la donnée toxicologique correspond à une dose administrée, la donnée toxicologique correspondant à la dose absorbée est obtenue en la corrigeant par le taux d'absorption pour la voie considérée

donnée toxicologique (dose absorbée) = donnée toxicologique (dose administrée) x taux d'absorption

? Dans le cas d'une substance à effet sans seuil : l'excès de risque unitaire correspondant à une dose administrée peut aussi être corrigé par le taux d'absorption pour la voie considérée pour correspondre à une dose absorbée

ERU (dose absorbée) = ERU (dose administrée) / taux d'absorption

On peut aussi adapter les données toxicologiques au milieu d'absorption considéré car l'efficacité d'absorption d'une substance n'est pas constante selon le milieu à partir duquel elle est absorbée.

Ainsi, lors de l'exposition par voie orale, l'absorption d'une substance peut avoir lieu à partir de l'eau ou à partir de sédiments ou d'aliments. En général, les études qui permettent d'établir les données toxicologiques utilisent l'eau comme milieu d'administration. Or l'absorption à partir de l'eau est souvent plus facile qu'à partir d'autres milieux. Si l'exposition dans le cas traité ne passe pas par l'eau, il est possible de tenir compte de la différence d'absorption dans les données toxicologiques (en faisant intervenir les taux d'absorption à

partir de chaque milieu). corrections de données.	L'évaluateur	veillera	cependant	à	rester	sécuritaire	dans	ses

ANNEXE 1B: RECOMMANDATIONS POUR L'ETUDE DU TERME TRANSFERTS

Le transfert résulte de la migration des polluants dans l'environnement. Les comportements des substances qui conduisent à leur migration sont liés :

- ? au potentiel de mobilisation des substances (propriétés intrinsèques des substances),
- ? à la matrice des sédiments (conditions du milieu source),
- ? aux caractéristiques des milieux traversés, et
- ? à des paramètres extérieurs tels que le climat ou l'existence possible de dispositifs de confinement.

1B-1 Description des transferts

1B-1.1 Potentiel de mobilisation des substances

Les propriétés physico-chimiques et la forme (spéciation) des substances présentes dans la source déterminent le potentiel de mobilisation des substances (leur aptitude à migrer). Ces caractéristiques sont définies lors de la caractérisation des sédiments (source) et sont nécessaires à la quantification du transfert.

Suivant l'état (solide, liquide ou gazeux) dans lequel se trouve préférentiellement la substance, elle aura d'autant plus d'affinité avec l'un ou l'autre des compartiments environnementaux. Le tableau 1B-1 donne pour quelques types de substances l'état pour lequel elles ont le plus d'affinité.

Tableau 1B-1 : Etat préférentiel de différents types de substances dans les sédiments

	Etat					
Type de substance	Solide adsorbé sur les particules de sédiments (dont les poussières)	En solution dans l'eau	Gazeux			
Métaux (sauf exceptions, comme le mercure)	++++	+	0			
Composés volatils	++	++	++++			
Composés hydrophiles	++	++	0			
Composés hydrophobes	++++	+	+			

- ? Une substance ayant une plus grande affinité pour l'eau a tendance à être transportée préférentiellement dans le milieu aqueux :
 - soit dans les eaux de surface ou souterraines,
 - soit à travers les couches de sédiments par drainage, lixiviation et infiltration.

En fonction du contexte du site, l'évaluateur s'attachera à caractériser ce transfert.

- ? Une substance ayant plus d'affinité pour l'état gazeux passe rapidement de la source vers l'air. Les cibles sont alors en contact avec elle par l'intermédiaire du milieu air et la voie d'exposition sera l'inhalation de vapeurs.
- ? Pour les substances préférentiellement à l'état solide, différents mécanismes peuvent intervenir :
 - migration dans les sédiments par simple gravité ;
 - migration avec les sédiments par adsorption sur des particules entraînées par les eaux :
 - migration dans les eaux superficielles ou souterraines par adsorption sur des particules en suspension ;
 - migration dans l'air par adsorption sur des poussières de sédiments envolées ;
 - tendance à l'immobilité : substance stable.

Il est également important d'évaluer les transformations éventuelles des substances afin d'évaluer le comportement d'une substances selon la forme sous laquelle elle est présente. L'Annexe 2A fournit des éléments pour apprécier l'évolution de certaines substances dans les sédiments.

Les paramètres à examiner pour déterminer les transferts potentiels reflètent les propriétés des substances. Certaines de ces propriétés sont décrites dans le Tableau 1B-2.

Tableau 1B-2 : Propriétés représentatives du potentiel de mobilisation des substances

Propriétés physiques	Symbole	Propriété associée (du point de vue de la mobilité)
Solubilité dans l'eau	S_w	Aptitude à se dissoudre dans l'eau
Constante de Henry	Н	Evaporation d'un composé en solution dans l'eau (volatilité)
Coefficient de partage eau-octanol	K _{ow}	Partage entre une phase aqueuse et une phase huileuse – évaluation de l'hydrophobicité
Constante d'adsorption (rapportée à la teneur en carbone)	K_{oc} , f_{oc}	Partage d'un composé entre la phase solide et la phase liquide
Durée de demi-vie	t _{1/2}	Persistance dans l'environnement
Pression de vapeur saturante	P _{sat}	Evaporation d'un composé pur (volatilité)

Cette liste sera adaptée à la situation examinée.

1B-1.2 Caractérisation de la matrice contenant les polluants

Les propriétés du milieu ou matrice de la source contribuent également à la mobilité des substances. Les conditions physico-chimiques des sédiments peuvent conduire à une modification des propriétés des substances et donc de leur mobilité.

Les paramètres à examiner sont les suivants :

- ? **Teneur en eau** : des teneurs en eau élevées peuvent augmenter la probabilité de lixiviation (passage en solution dans les eaux), et de drainage des substances ;
- ? Conditions d'oxydo-réduction (potentiel rédox) : certaines substances sont stables dans un milieu oxydant, tandis qu'elles sont mobiles dans un milieu réducteur (par exemple le fer ou le chrome) ;
- ? Conditions acido-basiques des sédiments (pH) : certaines substances sont stables dans des sédiments à pH basique, tandis qu'elles sont mobiles à pH acide (par exemple certains métaux);
- ? **Teneur en soufre et en sulfates** : l'analyse des sulfates et de la teneur en soufre total permet d'apprécier l'état de réduction du milieu ;
- ? **Teneur en carbonates** : la présence de carbonates, peu solubles, tend à immobiliser certains métaux (par exemple le plomb).
- ? **Teneurs en carbone et en argile** : les substances humiques immobilisent les particules hydrophobes et l'argile immobilise les particules chargées.

Les conditions du milieu de transfert doivent être prises en compte lors de la caractérisation du milieu. Elles permettent alors de mieux cibler les transferts à considérer en fonction de la forme ou de la spéciation des substances.

1B-1.3 Caractéristiques des milieux traversés

La connaissance de l'hydrologie et de l'hydrogéologie (nature des formations constituant le milieu) est indispensable pour comprendre dans le déplacement des substances de la source vers une cible potentielle. On examinera, par exemple :

- ? La géologie des milieux : la nature lithologique, l'étendue et l'épaisseur des formations et en particulier la nature physique du milieu : granulométrie, teneur en matière organique, perméabilité, l'aptitude à l'auto-épuration et l'atténuation naturelle, la capacité de rétention et temps de transfert des polluants...
- L'hydrogéologie: l'existence d'une ou plusieurs nappes, le type d'aquifère, le mode de circulation des eaux (sens, vitesse), la profondeur de la nappe, la perméabilité des zones saturée et non saturée, l'exploitation de la ressource ... On examinera également les possibilité d'infiltration des eaux de ruissellement et le recensement des cas connus de pollution de la nappe, ...
- ? L'hydrologie : l'existence et la proximité d'eau de surface, la pente des terrains, l'existence de réseaux de drainage, le potentiel d'inondation ...
- ? Les usages des eaux : recensement des points d'accès à la nappe d'alimentation en eau potable (périmètres de protection des captages AEP, pompage autre), usage agricole ou industriel des eaux (superficielles et souterraines), usage domestique (puits privés pour l'arrosage des jardins potagers), pêche, baignade...
- ? Les relations nappe-rivière : communications entre eaux de surface et eaux souterraines, typologie des berges, aménagements et équipements, existence d'une protection naturelle, drainage, perméabilité des sédiments...

Des recherches spécifiques pourront être menées pour renseigner les points précédents et obtenir :

- ? La qualité actuelle et les objectifs de qualité des eaux de surface selon le SDAGE,
- ? La qualité actuelle et les objectifs de qualité des sédiments selon le SDAGE (si existant),
- ? Le type de structures utilisées pour l'aménagement des berges afin de vérifier les relations entre la nappe au droit du site et les eaux de surface,
- ? Les objectifs de qualité de la nappe d'après le SDAGE,
- ? La qualité future potentielle ou visée (objectifs...) et les usages potentiels qui en découlent

1B-1.4 Autres paramètres

? Pratiques aux environs du site

L'utilisation des sols et des ressources en eau autour de la source, mais aussi au voisinage des cibles, fournit des indications sur les transferts et les expositions potentielles. En particulier l'agriculture, l'irrigation et l'élevage peuvent contribuer de manière significative à l'exposition.

? Faune, flore

Une description de l'état actuel de la faune et de la flore pourra être réalisée dans la zone sous influence :

- des sédiments en place (milieu aquatique et zones d'épandage de crues)
- ? des opérations de curage (chantier...)
- ? des opérations de transport (chargement, déchargement, lieux de fuites éventuelles...)
- ? de la zone de dépôt ou d'utilisation future des sédiments...

Cette description prendra en compte :

- ? la flore terrestre : végétaux supérieurs observés avec indication de leur fréquence dans le périmètre concerné.
- ? la végétation potentielle par des relevés effectués dans les différents milieux présents sur le site. Leur comparaison entre eux et avec d'autres données régionales permettra de caractériser les milieux et de prévoir leur évolution compte tenu de la dynamique naturelle de la végétation et/ou des impacts potentiels liés au mode de gestion des sédiments.
- ? la faune : avifaune, poissons et amphibiens qui sont les plus indicateurs de la valeur patrimoniale d'un site. L'inventaire considèrera la rareté et les statuts particuliers des espèces par rapport aux législations française et européenne.

Une comparaison avec des sites voisins et des sites considérés comme référence pourra être réalisée.

? Climat

Les conditions climatiques peuvent influer sur la mobilisation des substances dans la source et leur transfert dans les milieux.

Les précipitations favorisent le passage des substances dans les eaux par lixiviation des sédiments. Les pluies brutes et les pluies efficaces caractérisent les précipitations.

Les caractéristiques des vents (direction, vitesse) peuvent permettre de privilégier certains transferts dans l'air.

? Confinement potentiel

Enfin, la présence d'un confinement des sédiments (source) peut soit limiter, soit interrompre des transferts potentiels. Il peut être :

- ? **Naturel** : en raison de la nature des couches géologiques, les eaux souterraines peuvent être isolées des sédiments, et donc protégées ;
- ? **Artificiel**: l'aménagement d'un site pour la mise en dépôt de sédiments peut comprendre l'installation d'écrans imperméables (géosynthétique, argile,...), qui réduisent les transferts vers les eaux souterraines par lixiviation ou drainage des sédiments.

1B-2 Quantification des transferts

L'objectif de la quantification des transferts est d'estimer les concentrations aux points d'exposition. Ces concentrations peuvent être déterminées

- ? soit par la mesure au point d'exposition,
- ? soit par la modélisation, impliquant le choix d'hypothèses.

Les principaux moyens outils et sources d'information permettant de quantifier les paramètres caractéristiques des transferts sont :

- ? les investigations de terrain qui fourniront soit des données d'entrée afin de réaliser des modélisation soit des mesures des concentrations aux points d'exposition.
- ? la modélisation qui prend en compte des données de terrain mais aussi des données sur des paramètres spécifiques des substances et du milieu traversé qui n'ont pu être mesurer dans le cadre de l'étude réalisée.

1B-2.1 Mesure de terrain

? Caractérisation physique de la source et du milieu

Les données acquises sur le terrain permettent de mettre en évidence les propriétés des matériaux constituant la source et les milieux environnants qui influent sur les transferts. Quelques uns des principaux paramètres qui peuvent être mesurés sont :

? des grandeurs physico-chimiques des sédiments et des milieux environnants : pH, potentiel redox, teneur en eau, teneur en argile, teneur en matière organique, teneur en

carbonates, teneur en soufre, etc. qui ont différents effets sur le comportement des substances.

? des données géologiques et hydrogéologiques des milieux environnants : succession des horizons, profondeur de la nappe, perméabilité, gradient de la nappe, vitesse des transferts.

La réalisation de mesures pour quantifier ces paramètres fait partie des pratiques courantes dans le domaine de l'hydrogéologie et de la géotechnique et n'est donc pas abordée dans ce guide.

On rappelle toutefois que les cartes géologiques éditées par le BRGM permettent d'obtenir de premiers éléments de géologie et hydrogéologie. Une autre source d'information concernant le sous-sol et les eaux souterraines est la banque de données du sous-sol accessible par minitel ou par l'Internet (site Infoterre).

? Caractérisation chimique

On se reportera au guide méthodologique « Faut-il curer » pour une description des moyens et des méthodes qui permettent de caractériser la présence de substances dans les sédiments.

Chaque fois que possible, on veillera également à effectuer des mesures dans le milieu de transfert et aux points d'exposition. Ces mesures pourront alors se substituer à des modélisations ou être utilisées pour caler les modélisations.

? Mesures des concentrations d'exposition

Lorsqu'elles sont déterminées par la mesure, les concentrations d'exposition à retenir pour l'évaluation détaillée des risques sont en général :

- les moyennes arithmétiques dans chaque milieu des concentrations déterminées pour une exposition chronique.
- ? les concentrations maximales sur la période d'exposition retenue pour prendre en compte une exposition aiguë.

Dans chaque cas, le calcul d'une moyenne ou le choix d'une valeur maximale représentative n'est cependant possible que si un nombre suffisant de données est disponible. Un traitement statistique des données pourra être envisagé de manière à évaluer la fiabilité des données retenues pour l'évaluation des risques.

1B-2.2 Modélisation

Les transferts peuvent être représentés de manière mathématique à l'aide d'outils de modélisation. De nombreux modèles sont disponibles qui permettent d'étudier les transferts entre les compartiments environnementaux (sédiments—eaux, sédiments-air, notamment), ainsi que les phénomènes de bioaccumulation dans les végétaux et les animaux.

La modélisation de l'exposition est utilisée en complément des mesures. Les mesures réalisées à la source dans les sédiments et, le cas échéant, dans l'eau interstitielle et/ou souterraine servent de base au modèle de transfert pour estimer les concentrations au point d'exposition. Le modèle prend en général en compte :

- ? Les propriétés physiques des milieux de transfert des polluants (perméabilité, porosité, densité, teneur en matière organique, ...).
- Les propriétés physico-chimiques des polluants permettant de définir leur comportement (solubilité, volatilité, répartition de la phase adsorbée sur les sols et la phase dissoute dans l'eau interstitielle, coefficient de diffusion dans l'air et dans l'eau,...).
- ? Des paramètres physiques du site et des milieux cibles (surface, profondeur de la pollution, profondeur de la nappe d'eau souterraine,...).
- ? Les conditions climatiques (vitesse du vent).

Le modèle, en tant que traduction mathématique, implique cependant une simplification des phénomènes. L'évaluateur devra veiller à ne pas aboutir à une sous-estimation des concentrations, et les hypothèses utilisées devront être réalistes ou sécuritaires.

Pour une exposition chronique, les données d'entrée du modèle seront les concentrations moyennes arithmétiques en polluants dans les sédiments et les autres milieux et pour une exposition aiguë, les concentrations retenues seront les concentrations maximales.

L'utilisation de modèles suppose cependant quelques règles de bonne pratique, principalement :

- ? Les hypothèses prises en compte doivent être clairement définies ;
- ? Les incertitudes concernant les paramètres d'entrée doivent être réduites au maximum ;
- ? Le modèle doit être calé (à partir de points de mesure) ;
- ? Les résultats obtenus doivent être replacés dans le contexte d'une prédiction.

Certains modèles fournissaent des valeurs par défaut pour certains paramètres. L'évaluateur devra alors valider que les ces valeurs sont adaptées à la situation examinée.

Il existe enfin des modèles intégrant simultanément la quantification de plusieurs transferts. L'utilisation de ces modèles peut parfois se révéler insuffisante car elle ne permet pas de décrire systématiquement avec suffisamment de précision tous les transferts étudiés. Dans ce cas, il conviendra d'utiliser plusieurs modèles de transfert et d'exposition pour estimer les doses d'exposition.

? Transferts par l'eau souterraine

La migration d'un polluant dans les eaux souterraines (zone saturée) peut être quantifiée à l'aide de solutions analytiques mono-dimensionnelles. Cependant, ces transferts sont multidimensionnels et sont mieux représentés par les modèles numériques. De nombreux logiciels sont disponibles sur le marché.

La quantification de la migration d'un nuage de polluants au sein d'un aquifère par le biais d'un modèle numérique est utile dès lors qu'un objectif de la modélisation est bien défini, par exemple lorsque :

? une cible (captage AEP ou autre) est susceptible d'être atteinte par la pollution en aval ou latéralement à la source. Elle permet alors d'estimer les concentrations maximales pouvant atteindre la cible à court, moyen et long terme ainsi que d'implanter des points de surveillance de l'évolution de la qualité de l'eau de la nappe qui permettront de valider les résultats de la modélisation.

- ? Il existe un risque de décolmatage du fond du cours ou du plan d'eau. La modélisation peut alors servir à estimer la propagation des polluants entrant dans la nappe et d'évaluer si le panache de ces polluants pourra atteindre des cibles.
- ? la création d'un dépôt de sédiment ou leur épandage pourra conduire à un transfert de polluants des sédiments vers l'eau souterraine. La modélisation visera alors à estimer le transfert en zone non saturée.

? Transfert par les eaux de surface

La modélisation peut aussi être utile lorsque le panache des sédiments remise en suspension est susceptible d'impacter la qualité des eaux de surface. La modélisation peut alors permettre d'estimer les concentrations en polluants au niveau d'une cible (lieu de pêche, de baignade) en aval du site.

Dans un premier temps, la modélisation peut consister à appliquer des facteurs de dilution en fonction de la distance, calés sur des mesures dans le milieu, afin d'obtenir une concentration à la cible qui servira à la réalisation de l'évaluation détaillée des risques. Dans un second temps, une modélisation peut s'avérer nécessaire pour quantifier de manière plus précise la concentration à la cible.

Les modèles, numériques pour la plupart, pourront tenir compte en outre des débits, de la sédimentation, ou de réactions chimiques.

? Transferts par émanation de vapeur

Le transfert vers l'air ambiant peut se faire au travers des pores du sol, c'est à dire par exemple remontée de vapeurs vers la surface. Ce transfert de polluants volatils dans les pores du sol entre une source souterraine (eau ou sol contaminé) et la surface via les sols et les éventuels ouvrages bâtis peut être quantifié à l'aide :

- de solutions analytiques (diffusion, vaporisation en zone non saturée).
- de modèles numériques permettant la prise en compte de phénomènes plus complexes (dilution dans l'air, combinaison convection diffusion).

? Transfert par dispersion atmosphérique

Dans le domaine de la modélisation de la dispersion dans l'air, de nombreuses approches de résolution et de nombreux logiciels existent.

Les approches de résolution des phénomènes physiques appartiennent à trois grandes catégories :

- ? Méthode Gaussienne (ou semi-gaussienne) : approche statistique de la dispersion (panache),
- ? Méthode Lagrangienne, autre approche statistique (trajectoires)
- ? Méthode numérique classique (différences finies, éléments finis).

L'approche Gaussienne est valable pour un problème sur terrain peu accidenté, pour obtenir des valeurs moyennes sur du long terme, pour des polluants plus ou moins inertes (SOx, NOx).

Dans la mise en œuvre des modèles, plusieurs calculs s'enchaînent, et chaque calcul peut avoir une méthode de résolution particulière selon les conditions météorologiques modélisées (calcul du champ de vent, calcul de la turbulence, calcul des trajectoires, calcul du panache...).

De nombreux logiciels sont disponibles sur le marché, avec parfois des spécificités : calcul d'impact routier (prise en compte du parc automobile...), calcul de dispersion à partir de cheminées d'usines ou même calcul de propagation d'incendie.

Ces logiciels peuvent tenir compte de paramètres très différents (vent, températures, échauffement des surfaces, nébulosité, topographie, pluie), qui influencent la dispersion. Avant d'effectuer une modélisation, il est donc essentiel de savoir quels paramètres seront pris en compte, et lesquels ne seront pas considérés, afin d'apprécier les limites du modèle réalisé.

? Transferts par la chaîne alimentaire

Il existe des modèles de bioaccumulation dans les plantes ou les végétaux, qui rendent compte des divers phénomènes (cultures sur des terres contenant des polluants, arrosage par de l'eau contaminée par les sédiments...). Les modèles de bioaccumulation des métaux ont fait l'objet de nombreuses études de validation. Les phénomènes de bioaccumulation des composés organiques sont plus complexes et plus délicats à modéliser.

? Sources d'information

Les modélisations supposent souvent la connaissance d'un nombre important de paramètres sur le milieu et les substances.

Les valeurs des paramètres décrivant les propriétés des substances peuvent être accessibles dans des bases de données bibliographiques physique-chimie, telles que les fiches INRS et les fiches INERIS (en préparation). Une liste des sources d'information sur les produits chimiques fait l'objet d'une annexe du guide technique Gestion et Traitement des sites pollués – Diagnostic approfondi et Evaluation détaillée des risques, Version de juin 1999 (annexe 8).

Les données climatiques sont fournies par Météo France. Il est conseillé de demander des données moyennées sur les cinq dernières années pour la station météorologique la plus proche du site étudié.

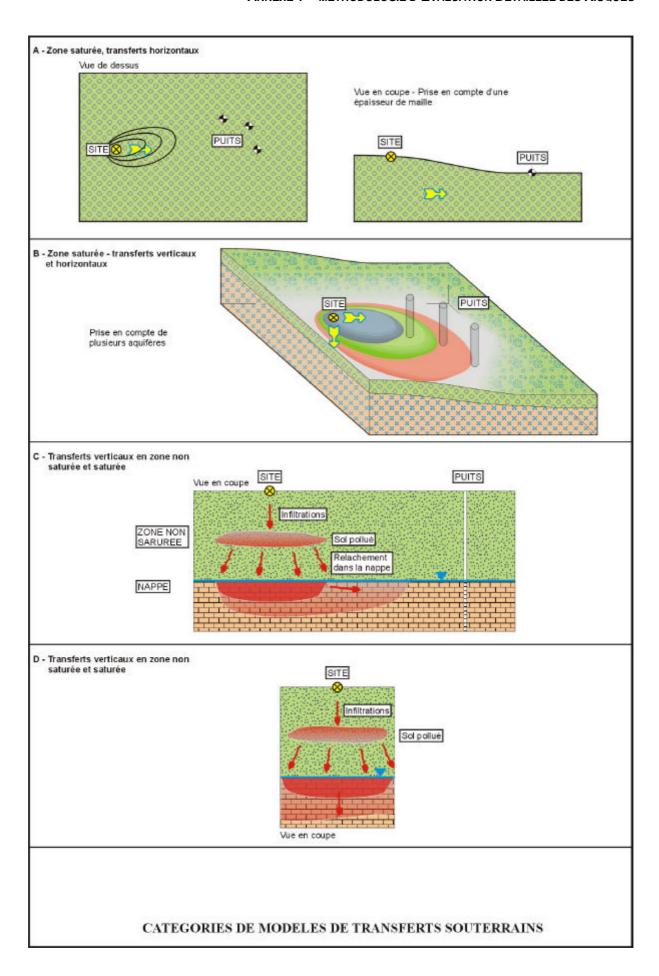
Diverses informations sur l'eau peuvent également être obtenues auprès des organismes recensés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1B-6. : Sources potentielles d'informations sur l'eau - type d'informations et organismes fournisseurs

Organisme	Type d'information susceptible d'être communiquée
DDASS	Captages AEP (localisation)
	Périmètres de protection
	Qualité des eaux brutes captées
	Qualité des eaux de baignade
DDE	Caractéristiques réglementaires relatives à la zone ou au cours d'eau
	étudié et objectif de qualité
	Atlas des zones inondables
	Plan de prévention des risques
DDAF	Caractéristiques réglementaires relatives à la zone ou au cours d'eau
	étudié et objectif de qualité
	Pêche (catégorie piscicole)
	Atlas des zones inondables
	Plan de prévention des risques
Agence de	Qualité des eaux superficielles (paramètres physico-chimiques,
l'eau	bactériologiques)
	Points de rejet de la zone d'étude ; qualité des rejets (complément éventuel
	nécessaire auprès de la DRIRE ou des Services vétérinaires)
DIREN	Débits caractéristiques
	Atlas des zones inondables
	Plan de prévention des risques
	Qualité des eaux superficielles et souterraines
	Zones naturelles protégées (ZNIEFF, ZICO)
DRIRE	Rejets industriels
Police des	Qualité des eaux superficielles et estuariennes
eaux	
Collectivités	Utilisation des ressources en eau, schémas d'aménagement, POS

Tableau 2 a : Les modèles d'exposition

Logiciel	Auteurs	Objectifs	Phases	Limites/points faibles	Voies d'exposition	Résumé - points forts	Coût du logicie I
RBCA	American Society for Testing and Materials	Protection de la santé humaine (quantification de l'exposition) et de l'environnement (approche qualitative)	Sols Eaux souterraines	Ne prend pas en compte la volatilisation à l'extérieur d'un bâtiment avec une couverture du sol Ne prend pas en compte la présence d'un vide sanitaire sous les bâtiments	Transport de polluants dissous Dissolution de composés Volatilisation de composés et envol de particules Lixiviation	Développé pour les composés hydrocarbures	800 \$
HESP		Estimation de l'exposition des hommes à des contaminants	Aliments Eaux	Scénarii fixés peu modulables Impossibilité d'utiliser d'autres bases de données que celles intégrées dans le modèle Utilisation peu conviviale Estimation de doses d'exposition	Ingestion de sol, d'eau ou d'aliments, inhalation de vapeurs et de particules, contact cutané	Modifié et utilisé par le Ministère de l'Environnement pour le calcul des VCI Intégration de bases de données physico-chimiques dans le modèle	
CSOIL	Versluijs CW, Koops R, Waitz MFW (RIVM)	Quantification de l'exposition humaine à des sols contaminés Utilisé pour le calcul de valeurs seuils hollandaises	Sols	Transport des contaminants vers les plantes mal défini Convient mal aux metaux et aux composés volatils	Accumulation des contaminants dans les parties aériennes et souterraines des végétaux		
SEDI- SOIL	Bocking GJM, Koolenbrabder JGM, Swartjes FA (RIVM)	Exposition aux sediments	Sédiments eaux de surface poissons	calculs non précis Modèle non disponible en anglais	Codes de calcul identiques à CSOIL	Estimation de l'urgence d'une remédiation en cas de contamination importante	
VOLA- SOIL	Waitz MFW, Freijer JI, Kreule P, Swartjes FA (RIVM)	CSOIL adapaté aux composés volatils	Sols Phases flottantes Phases libres dans la frange de capillarité		Calcul des concentrations à l'intérieur de bâtiments construits sur des sols pollués	Modèle flexible car combinaison possible de modèles et de mesures Utilisation simple sous Windows	
IEUBK	EPA	Calcul de la plombémie (taux de plomb dans la sang des enfants)	Sol Eau Lait maternel Alimentation Air et poussières	Uniquement l'exposition au plomb Ne calcule pas l'exposition pour les adultes	Ingestion, inhalation par toutes les phases citées	Prend en compte le métabolisme du plomb dans l'organisme et pas seulement l'accumulation du métal	
имѕ	Modèle allemand		sols	Mal adapté aux composés organiques		Mieux adapté que Csoil à l'estimation des risques pour les métaux	



Solution analytique de Domenico	Domenico	Simulation monodimensionnelle du transport de soluté	Zone saturée	Régime permanent Nappe libre	Phase liquide, adsorbée et dissoute	Biodégradation, Adsorption	Solution analytique qui représente très succintement les phénomènes de transport dans une nappe. Géométrie en 1 dimension	Concentrations à différentes distances de la source
	Scientific software group	Simulation 3D hydrodynamique et de transport des solutés avec divers mécanismes de dégradation	Zone saturée	Régime permanent Nappe libre	Phase liquide, adsorbée et dissoute	Biodégradation aérobie, Echanges d'ions avec différentes espèces, Adsorption	Simule le transport sur une base hydrodynamique de régime permanent. Géométrie en 2D (monocouche).	Concentrations en hydrocarb concentrations en oxygène
FLOWPATH II	Waterloo Hydrogeologic Software	Simulation 2D hydrodynamique et de transport de soluté	Zone saturée	Régime permanent ou transitoire Nappe libre ou captive	Phase liquide, adsorbée et dissoute	Biodégradation, Adsorption	Géométrie en 2 dimensions	Pressions, concentrations.
FLOTRANS	Waterloo Hydrogeologic Software	Simulation 2D hydrodynamique et de transport de soluté	Zone saturée	Régime permanent Nappe libre	Phase liquide, adsorbée et dissoute	Biodégradation, Adsorption	Géométrie en 2 dimensions Régime permanent Nappe libre uniquement	Pressions, concentrations, tra particules.
M13D 96)	Codes de calcul : USGS, Papadopoulos & Associates, Interface Visual Modflow : Waterloo Hydrogeologic software	Simulation 3D	Zone saturée	Régime permanent ou transitoire Nappe libre ou captive	Phase liquide, adsorbée et dissoute	Biodégradation sur phase dissoute et/ou adsorbée Adsorption avec plusieurs isothermes possibles (Linéaire <=> Retard, Langmuir, Freundlich).	Temps de calculs longs pour le transport.	Pressions, vitesses, concentr trajet de particules
AQUA 3D	Vatnaskill Consulting Ingineers	transport de soluté		Régime permanent ou transitoire Nappe libre ou captive	Phase aqueuse, adsorbée et dissoute, nappes libres ou captives	Biodégradation, Adsorption		Pression, concentrations ou températures
RISKPRO'S SESOIL	General Science Corporation	Simulation hydrodynamique 2D et de transport (RISKPRO), couplée à une lixiviation de la zone non- saturée (SESOIL)	Zone saturée (RISKPRO) et non-saturée (SESOIL)	Régime permanent (?) Nappe libre	Phase liquide, adsorbée et dissoute	Biodégradation, Adsorption	Géométrie en 2 dimensions. Nappe libre uniquement.	Relâchement dans la nappe Pressions, concentrations
SUTRA (version Windows : SUTRA- ANE)	USGS Interface Windows : Sarig	Simulation hydrodynamique 2D et de transport en zone saturée et non-saturée de soluté	Zone caturée		Phase liquide, adsorbée et dissoute	Biodégradation Adsorption avec plusieurs isothermes possibles.	Géométrie en 2 dimensions, soit coupe verticale (ZNS), soit plan 2D (ZS)	Pressions, teneurs en eau, concentrations
BIO F&T 3D	Draper Aden Environmental Modeling Inc.	Simulation hydrodynamique 2D ou 3D et de transport multiphase	Zone saturée et non-saturée	Régime permanent ou transitoire Nappe libre	Phases liquides (multiples), phase adsorbée, phase dissoute	Biodégradation avec multiples produits fils Adsorption Biodégradation aérobie (oxygène = facteur limitant) et anaérobie	Utilisation complexe. Représentation 2D de la zone non- saturée, et 3D de la zone saturée.	Pressions, concentrations.
MOTRANS	Environmental Systems & Technologies, Inc	Simulation 2D verticale de transport multiphasique	Zone saturée et non-saturée	Régime permanent ou transitoire Nappe libre	Phase liquide, phase dissoute, phase flottante, phase adsorbée et phase gazeuse	Biodégradation, Répartition dans les différentes phases (solide, gaz, flottant, eau)	Géométrie en 2 dimensions, verticale ou radiale	Pressions, concentrations.

Tableau 2 c : Les modèles de transfert par l'air

Logiciel	Auteurs	Contact	Dimension s	Туре	Particularités	Achats / Prestations
Pampa, ADSO, et autres logiciels	ARIA technologies	14-30 rue de Mantes 92700 Colombes France www.aria.fr	3 Dimensions	Quasi-gaussien	Météorologie et topographie complexe prises en compte (champ de vent calculé, nuages)	Tarifs sur demande ARIA est capable de réaliser les études
Panache	Transoft International	7, bd de Libération 93200 Saint Denis France transoft@pobox.ol eane.com	3 Dimensions	Différences finies	Météorologie et topographie complexe prises en compte (champ de vent calculé, nuages)	Tarifs sur demande Transoft est capable de réaliser les études
ADMS-2	Cambridge Environmental Research Consultants Ltd	3 King's Parade Cambridge CB2 1SJ Royaume Uni	3 Dimensions	Quasi-gaussien	Météorologie et topographie complexe prises en compte (champ de vent calculé, nuages)	Tarifs sur demande
Stoer.Lag	Schorling & Partner	Innsbrucker Ring 152 D - 81669 Munchen Allemagne	3 Dimensions	Lagrangien	Pas de réaction chimique, Topographie complexe, champ de vent calculé	Tarifs sur demande Schorling & Partner est capable de réaliser les études
Stacks	KEMA	P.O. box 9035 6800 ET Arnheim Hollande	3 Dimensions	Gaussien	Météorologie et topographie complexe prises en compte (champ de vent calculé, nuages) Code reconnu en Hollande	Tarifs sur demande
DIMULA	M.C. Cirillo	ENEA -CRE Casaccia CP 2400 00100 Roma Italie	3 Dimensions	Gaussien	Facile à utiliser Surface plane, pas de réaction chimique, possibilité de calculer dans des conditions de temps calme	Tarifs sur demande
IFDM	VITO	Boeretang 200 B2400 Mol Belgique	3 Dimensions	Gaussien	Régime de vent permanent, surface plane ou peu inclinée, pas de réaction chimique	Tarifs sur demande
Logiciels américains commercial isés	Computer products National Technical Information Service	US Department of Commerce Springfield Virginia 22161 Etats-Unis Tel (703) 487-4650				Tarifs sur demande

ANNEXE 2: APPLICATION AUX SEDIMENTS

L'Annexe 2 présente des spécificités de la gestion des sédiments et se décompose en :

- ? L'annexe 2A : comportement des polluants organiques et métalliques dans les sédiments ;
- ? L'annexe 2B : Spécificité des sédiments et des opérations de curage

ANNEXE 2A : Comportement des polluants organiques et métalliques dans les sédiments

Certains sédiments que l'on rencontre dans les fossés, rivières, canaux ou plans d'eau, peuvent révéler des concentrations en éléments « indésirables » (métaux, composés organiques) particulièrement élevées.

Ces éléments sont issus, notamment, des apports au milieu aquatique d'eau de ruissellement ou d'eaux usées (process industriel ou urbain) dans des secteurs fortement urbanisés et/ou industrialisés.

Certaines concentrations élevées, notamment en métaux, peuvent être liées au contexte géochimique naturel local ou au contexte historique régional (anciens secteurs miniers, métallurgiques...).

Dans le cadre de l'Evaluation Détaillée des Risques, ce n'est pas seulement la présence ou l'absence de tel ou tel polluant qui est déterminante, mais c'est également, le risque de transfert de ce polluant vers l'homme (directement ou indirectement).

Or, ce risque de transfert est très variable et dépend essentiellement des caractéristiques physico-chimiques du sédiment et des interactions polluant - sédiment.

L'objet de cette annexe est de présenter les données de base sur la mobilité des polluants les plus fréquents dans les sédiments et sur les caractéristiques physico-chimiques générales des sédiments.

1 Caractéristiques physico-chimiques d'un sédiment

Les particules solides qui les constituent les dépôts de sédiments peuvent être d'origine naturelle ou anthrophique .

- ? **Origine naturelle** : les particules peuvent être soit endogènes ou exogènes au cours d'eau.
 - Les particules endogènes sont principalement constituées de matières organiques essentiellement composée des organismes aquatiques appartenant aux règnes animal ou végétal (plancton, plantes supérieures, algues,....)
 - Les particules exogènes sont principalement des particules minérales provenant d'une part de l'érosion éolienne des sols et d'autre part de l'érosion hydrique du bassin versant et des phénomènes de ruissellement. Les particules exogènes peuvent également être de nature organique, principalement des feuilles d'arbres transportées par le vent dans le canal.
- ? **Origine anthropique :** les particules peuvent être de nature organique ou minérale et proviennent des activités industrielles, urbaines ou agricoles.

1.1 Composition physique des sédiments

Les sédiments sont essentiellement composés d'eau interstitielle et de particules solides. L'eau interstitielle peut représenter jusqu'à 90 % du volume d'un sédiment non compacté et jusqu'à 50 % pour des horizons plus profonds et donc plus compactés. Comme pour les

sols, les particules solides sont principalement composées de sables, de limons, d'argiles, de matières organiques et d'oxydes de fer et de manganèse.

? Composition granulomètrique des sédiments

Suivant les régions géographiques, les sédiments ont des granulométries très différentes. On distingue généralement la fraction grossière de la fraction fine.

La fraction grossière a une granulométrie supérieure à 50 µmet se subdivise en :

- ? Une fraction dont la taille est supérieure à 2 mm constituée de débris végétaux ou d'agrégats de particules différentes,
- ? Des sables grossiers dont la taille est comprise entre 2 mm et 200 µm,
- ? Des sables fins et des limons dont la taille est comprise entre 200 µm et 50µm.

La fraction fine a une granulométrie inférieure à 50 µm. Elle se subdivise en :

- ? Des limons grossiers dont la taille est comprise entre 50 µm et 20 µm,
- ? Des limons fins dont la taille est comprise entre 20 µm et 2 µm,
- ? Des argiles de granulométrie inférieure à 2 µm. Le terme « argile » est souvent utilisé au lieu de colloïdes minéraux. Cependant, ce terme prête à confusion. En pédologie, les argiles désignent les éléments inférieurs à 2 µm mais ne sont pas uniquement constituées d'argiles minéralogiques. Elles contiennent, en outre, du quartz fin, du carbonate de calcium colloïdal, des oxydes métalliques et de la matière organique associée aux argiles (définies dans le sens minéralogique du terme).

Les pourcentages de fractions fines ou grossières dépendent de la région et de la nature du milieu aquatique (rivières, estuaires, zones côtières,....). Dans tous les cas, ce sont les fractions fines, et plus particulièrement les argiles, qui sont responsables de la cohésion des sédiments en raison de leurs propriétés électriques et de leur structure en feuillets. Ce sont elles aussi qui adsorbent les polluants. Composition géochimique des sédiments

Cette section aborde les composés des sédiments qui ont le plus d'incidence sur leur comportement.

1.2 Composition géochimique des sédiments

? Les argiles

Les argiles dans le sens minéralogique du terme proviennent de la décomposition lente de minéraux comme le feldthpath, les micas, las amphiboles et les pyroxènes. Ce sont des silicates d'alumine, plus ou moins hydratés, de formule générale (n SiO₂Al₂O₃ m H₂O) dont le rapport moléculaire SiO₂ / Al₂O₃ varie entre deux et cinq.

Les argiles présentent une structure cristalline disposée en feuillets à écartements caractéristiques. Les feuillets sont constitués d'un empilement de couches tétraédriques de SiO₂ et de couches octaédriques de Al₂O_{3.} La classification des argiles se fait en fonction de trois critères :

- ? la structure des feuillets,
- ? l'espacement des feuillets
- ? les substitutions de charges au sein des feuillets.

Ainsi, on peut distinguer quatre grandes familles d'argiles :

- ? la kaolinite (10 Å),
- ? les illites (12 Å),
- ? les montmorillonites (14 Å)
- ? les attapulgites (argiles fibreuses).

La substitution des charges est une propriété fondamentale des argiles. Elle permet d'expliquer leur capacité d'échange cationique qui est à l'origine :

- ? de leur gonflement dans l'eau ou de leur caractère colloïdal,
- ? de leur affinité pour les métaux lourds.
- ? du pouvoir tampon des sols et des sédiments,
- ? et de leur complexation avec la matière organique (complexes argilo-humiques).

Les argiles sont des molécules chargées négativement. Cette charge négative est essentiellement due à la substitution des ions Si⁴⁺ par les ions Al³⁺ à l'intérieur et à l'extérieur des feuillets. Cependant, certaines charges négatives sont présentes à la surface des feuillets et sont dues à des liaisons brisées ou à des fonctions hydroxyles. Les charges négatives ainsi produites sont capables de former des liaisons avec des cations (H⁺, Na⁺, Mg⁺⁺, Ca⁺⁺, Fe ++,.....) aussi bien sur les faces internes que sur les faces externes des feuillets.

Ces liaisons sont essentiellement réversibles. L'ensemble de ces liaisons explique la capacité d'échange cationique des argiles. Outre le type d'argile, la capacité d'échange dépend également des dimensions du cation à échanger. Elle est d'autant plus importante que le cation est petit.

? La matière organique :

La matière organique est essentiellement composée d'acides humiques et fulviques.

Ce sont des molécules colloïdales chargées négativement qui résultent du processus d'humification (transformation en humus de la matière organique morte, sous l'action des micro-organismes du sol). Leur unité structurale est constituée de noyaux aromatiques (phénolique ou quinonique) et de chaînes périphériques aliphatiques (uronides, saccharides, acides aminés).

Les acides fulviques possèdent des chaînes aliphatiques développées par rapport au noyau aromatique peu polymérisé. Ils sont solubles dans l'eau mais précipitent en présence de fer ou d'aluminium.

Au contraire, les acides humiques possèdent un noyau aromatique plus développé que les chaînes aliphatiques. Leur solubilité dans l'eau diminue avec le degré de polymérisation du noyau aromatique.

Les acides humiques réagissent avec les argiles pour former le complexe argilo-humique. Ce complexe est capable d'absorber divers ions. Il est souvent insoluble dans l'eau et flocule en milieu acide ou en présence d'ions positifs essentiellement bivalents tels que le calcium ou le magnésium.

? Les carbonates

Il est essentiel dans l'évolution de la matière organique, la formation des argiles, la nature du complexe argilo-humique et la nutrition de la flore aquatique. Le calcium se présente sous différentes formes dans les sols et sédiments. Par ordre de solubilité croissante, on distingue :

- ? Le calcium emprisonné dans les minéraux complexes tels que le feldthpath ou le pyroxène,
- ? Le calcaire inactif ; il existe à l'état de grains grossiers ou cristallins. Sa cinétique de dissolution est plus lente que celle du calcaire actif,
- ? Le calcaire actif : il existe dans la fraction fine des sédiments (argiles et limons fins). Dans de l'eau chargée en dioxyde carbone, il se transforme en bicarbonate de calcium soluble,
- ? Le calcium échangeable et le calcium soluble : il s'agit essentiellement du bicarbonate de calcium dont la concentration est dépendante de la concentration en calcaire actif et de concentration en dioxyde de carbone.

Le calcium présente une grande affinité vis à vis des métaux lourds.

? Les oxydes de fer et de manganèse :

La précipitation des oxydes de fer ou de manganèse dépend plus des conditions d'oxydoréduction du milieu que du pH. Ces oxydes se présentent sous la forme de petites particules et contribuent largement à l'augmentation de la surface d'adsorption totale du sédiment. Ils apparaissent également dans les eaux souterraines là où elle remontent à la surface.

? Les sulfures

Les sulfures peuvent être organiques ou minéraux. En raison des conditions réductrices et anaérobies, les sulfures sont prépondérants par rapport aux sulfates dans les sédiments et sont à l'origine de leur couleur grise ou noire.

Dans des conditions très réductrices, les métaux précipitent sous forme de sulfures insolubles.

1.3 Dynamique de la sédimentation

La grande majorité des particules en suspension dans les sédiments se retrouvent tôt ou tard accumulées au fond des cours d'eau. Pourtant, certaines particules peuvent parcourir des distances considérables selon leurs caractéristiques physiques et les particularités du milieu.

En effet, de nombreux facteurs propres au cours d'eau influencent directement la sédimentation des particules :

- ? le débit,
- ? la direction et la stabilité du courant,

- ? les turbulences,
- la forme et la profondeur des cours d'eau

Outre ces paramètres hydrodynamiques, la sédimentation dépend largement de la taille des particules. Pour qu'une particule sédimente, la vitesse du courant doit descendre sous une valeur critique. Cette dernière est d'autant plus faible que la particule est petite. Ainsi, les particules fines qui sont facilement emportées par le courant, ont tendance à se déposer dans les zones calmes des cours d'eau. Par contre, les particules grossières comme les sables et les graviers nécessitent moins de stabilité au niveau du courant et peuvent sédimenter dans les zones plus agitées .

En plus des facteurs physiques et hydrodynamiques, les propriétés chimiques du milieu aquatique jouent un rôle important dans le processus de sédimentation. La précipitation des particules est, par exemple, favorisée dans un milieu réducteur et alcalin. La sédimentation est également facilitée dans les eaux salines et denses. Enfin, la température peut s'avérer être un facteur déterminant dans la sédimentation des particules dans la mesure où elle favorise la transformation de certains éléments en formes chimiques insolubles. C'est le cas de la précipitation de nombreux éléments sous forme de carbonates : les faibles températures favorisent leur formation en raison de la grande solubilité du dioxyde de carbone .

2. Les HAP

Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) représentent un ensemble complexe de molécules hétérogènes, tant en terme de propriétés physico-chimiques que de propriétés toxicologiques, qui dépendent du nombre de cycles benzéniques. Ces composés sont des produits spécifiques des usines à gaz et constitutifs des goudrons.

Pour l'évaluation simplifiée des risques, plusieurs composés ont été sélectionnés comme des substances témoins de la présence de HAP. Une liste de 6 HAP et de 10 HAP comprenant les composés les plus dangereux (six composés cancérigènes que sont le benzo(a)pyrène, le benzo(a)anthracène, le dibenzo(a,h)anthracène, le benzo(b)fluoranthène, le benzo-(k)fluoranthène et le indéno(c,d)pyrène) a été établie. Par contre l'USEPA préconise de s'intéresser à 16 hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Ces composés s'analyse généralement dans les eaux à l'aide de la méthode EAP 8100.

3. Les PCB

Les PCB (souvent connus sous le nom d'Arochlor en France)sont des liquides huileux ou des solides, stables chimiquement et thermiquement, inertes vis-à-vis de l'oxydation et de l'hydrolyse, résistants aux bases et aux acides et donc très persistants dans l'environnement. Ils sont généralement présents sous forme de mélanges.

Dans l'air, ils sont généralement présents sous forme de phase vapeur, d'aérosols liquides ou solides. Ils peuvent être transportés dans l'air sur de longues distances. Les PCB sont faiblement solubles dans l'eau, mais la plupart tend à s'adsorber sur des particules et des sédiments.

Les PCB sont considérés comme des substances peu biodégradables, et plus le nombre de chlore est important, plus ils sont persistants. Les PCB sont des substances qui s'accumulent dans les systèmes organiques, et en particulier dans les végétaux.

Les PCB sont des substances dangereuses, classifiées comme toxiques par l'ATSDR, et cancérigènes par l'USEPA. Il convient de rester prudent vis-à-vis des études toxicologiques américaines, car les PCB utilisés en France n'ont pas les mêmes caractéristiques physiques, chimiques et toxicologiques que les PCB utilisés aux Etats Unis.

Il existe une méthode d'analyse normalisée dans les eaux par chromatographie en phase gazeuse après extraction liquide-liquide des PCB; la méthode est T-90-120.

4. Les métaux

Cette section présente certaines propriétés des métaux les plus toxiques fréquemment rencontrés dans les cours d'eau. Les métaux sont une famille assez vaste de composés chimiques parmi lesquels on distingue les « éléments traces métalliques » qui sont au nombre de soixante huit et qui représentent moins de 0,1 % de la matière sèche totale de la croûte terrestre par élément.

Certains de ces éléments sont considérés comme des oligo-éléments (cuivre, zinc, fer, manganèse, nickel, molybdène,...) cependant, la plupart de ces éléments sont toxiques (cadmium, mercure, plomb, étain, ...) dès que leurs concentrations dans les organismes vivants dépassent un seuil donné.

Bien que le terme « éléments traces métalliques » soit plus correct, on conservera pour des raisons de commodité, la désignation courante de métaux.

Les éléments peuvent être classifiés en fonction de différents critères tels que leur valence ou leur tendance à se lier aux ions fluor (F) et iode (I) (classification en fonction de la dureté des ions métalliques). D'autres auteurs ont proposé une classification des ions métalliques en fonction de leur affinité aux principaux ligands biologiques :

- la classe A regroupe les éléments ayant une meilleure affinité pour les ligands contenant des atomes d'oxygène (O²-, OH-, CO₃ ²-, NO₃-, SO₄-, RCOO-; ROH; HPO₄-...),
- ? la classe B comprend les métaux ayant une affinité plus grande pour les ligands contenant des atomes d'azote et du soufre (CN-, S²-, RS-,R²S, R³As, H-, I-, R-...),
- la classe C est une classe intermédiaire qui correspond aux métaux se liant indifféremment aux ligands à base d'oxygène, d'azote ou de soufre (SO₃²⁻, NO₂-, NH₄+, O²⁻...). La plupart des métaux figurent dans cette classe notamment le zinc, le cadmium, le chrome, le cuivre et le nickel.

4.1 Sources de pollution

Les métaux, naturellement présents dans l'écorce terrestre, proviennent généralement de l'altération et de l'érosion des roches. Des activités anthropogéniques particulières peuvent cependant entraîner leur dispersion dans les sols et les sédiments. Les sources de pollution par les métaux sont résumées par le Tableau B-1.

Tableau B-1 : Sources de pollution des métaux lourds d'après Baize et Janiec (1994)

Cadmium	Engrais phosphatés ; industries de traitement de surface des métaux ; industrie de stabilisation des matières plastiques ; fabrication des accumulateurs et des radiateurs d'automobiles ; fabrication de				
	caoutchouc ; colorants ; eaux de ruissellement des voies de circulation.				
Cuivre	Canalisation d'eau ; fils électriques ; radiateurs d'automobiles ; appareils de chauffage ; traitement de surface.				
Zinc	Produits pharmaceutiques ou domestiques ; conduites d'eau ; peintures ; piles ; galvanisation ; traitement de surface				
Nickel	Fabrication d'aciers et d'alliages spéciaux ; recouvrement de surface par électrolyse ; hydrogénation des huiles et substances organiques ; fabrication de peintures, de laque et de produits cosmétiques.				
	Produits pharmaceutiques ou domestiques ; production et utilisation				
Mercure	d'antifongiques ; appareils électriques ; produits électrolytiques du chlore et de la soude ; peintures, pâte à papier ; fabrication de chlorure de vinyle et d'uréthane.				
Chrome	Tannerie ; fabrication d'alliages spéciaux ; industries de traitement de surface.				
Plomb	Canalisations d'eau ; bacs de batteries ; peintures ; additifs pour l'essence ; eaux de ruissellement des voies de circulation, industries pharmaceutiques et sidérurgiques ; ateliers photographiques, télévisions.				
Sélénium	Fabrication de peintures et colorants, verre, semi-conducteurs, insecticides, alliages.				
Arsenic	Pesticides, herbicides, fongicides, insecticides, raticides, défoliants, conservateurs du bois; cellules solaires; semi-conducteurs; électrophotographie; catalyse; pyrotechniques, céramiques, produits pharmaceutiques, épilage des peaux en tannerie et mégisserie; durcissement du cuivre et du plomb, fabrication des batteries.				

4.2 Toxicité des métaux

La toxicité des métaux dans les sédiments ou les sols a surtout été étudiée sur les microorganismes (bactéries, champignons). Les données, ci-après, sont issues de la bibliographie concernant ces organismes vivants.

Les métaux exercent leurs effets toxiques envers les micro-organismes en raison de leur grande capacité à former des liaisons avec des ligands cellulaires

Ces liaisons peuvent être ioniques entre les ions F^{*} , O_2^{*} , CI^{*} et Br^{*} . Plus le métal est électronégatif, plus la liaison est forte et plus la toxicité est importante. Ces liaisons peuvent également être des liaisons de coordination donnant des complexes entre les cations métalliques et les différents ligands cellulaires tels que les groupes -OH, -NH $_2$, -SH, les porphyrines et les peptides. Plus le complexe [cations métalliques – ligand cellulaire] est stable, plus la toxicité est importante .

Cependant, le contact direct entre le cation métallique et les ligands cellulaires n'est pas le seul mécanisme de toxicité observé. Les ions métalliques tels que les ions Hg^{2+} , Cd^{2+} ou Pb^{2+} peuvent induire une toxicité dans les cellules animales. En effet, ils perturbent l'action d'enzymes protectrices impliquées dans l'élimination de radicaux libres. Ces derniers (ex. OH) sont toxiques car ils provoquent l'oxydation des lipides membranaires et donc la perte de l'intégrité membranaire .

Les interactions entre les micro-organismes et les métaux lourds sont complexes. En fait, la nature et le degré observé de toxicité dépendent de trois grands facteurs : le métal (nature, forme chimique et concentration), les micro-organismes en question et enfin, l'environnement physico-chimique et biotique dans lequel les interactions métal / micro-organismes ont lieu.

La toxicité des métaux envers les champignons est largement retardée à la suite de leur complexation avec les matières organiques dissoutes ou en suspension qui sont présentes dans l'environnement. Ces matières organiques peuvent être des acides humiques, des acides fulviques, des colloïdes, des protéines, des acides aminés soufrés ainsi que divers métabolites sécrétés par la faune et la flore du milieu tels que les acides organiques produits par les champignons eux-mêmes .

Dans certains cas, les complexes métalliques formés peuvent être plus toxiques que les métaux libres eux-mêmes. Cependant, ces complexes toxiques sont souvent volatils et sont donc naturellement éliminés de l'environnement comme dans le cas des dérivés méthylés du mercure.

La toxicité des métaux envers les champignons est réduite en présence d'argile grâce à sa capacité d'échanger ses propres cations tels que les ions CA⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, Na ⁺ H⁺ par les métaux présents dans le milieu.

Le pH affecte la toxicité des métaux en influençant la forme sous laquelle ces métaux existent en solution. En général, sauf dans le cas des métaux amphotères tels que le zinc ou le cuivre, une augmentation du pH entraîne souvent la précipitation des cations métalliques sous formes d'hydroxydes ou d'oxydes métalliques insolubles selon la réaction :

$$M^{2+} O^{H-} (M OH)^{+} O^{H-} M (OH)_{2} O^{H-} (M (OH)_{3})^{-} O^{H-} (M5OH^{\circ}_{4})^{2-} ...$$

Les précipités formés étant moins toxiques que les cations métalliques libres, une diminution de toxicité est alors observée .

La toxicité des métaux ne dépend pas uniquement de la forme sous laquelle ceux-ci existent en solution. Elle dépend également de l'affinité des métaux pour les ligands cellulaires qui est elle même déterminée par le pH du milieu. Certains auteurs distinguent deux classes de métaux :

- La classe I comprend les métaux qui établissent des liaisons faibles avec les ligands cellulaires (groupements –OH₂ COOH, -NH₂, CONH₂), tels que le cadmium et le zinc, et dont la concentration de la forme aqueuse demeure peu élevée lors d'une baisse de pH. Une baisse du pH entraîne alors une diminution de la toxicité de ces métaux car les ions H⁺ sont des compétiteurs plus puissants que les cations métalliques pour les ligands cellulaires.
- ? La classe II comprend des métaux, tels que le plomb, qui ont une grande affinité pour les ligands cellulaires et dont la concentration aqueuse augmente remarquablement lors d'une baisse du pH. Dans ce cas, les ions H⁺ sont des compétiteurs moins puissants que les cations métalliques pour les ligands cellulaires, ce qui entraîne une augmentation de la toxicité de ces métaux lorsque le pH diminue.

La relation entre la toxicité des métaux et le pH n'est pas toujours bien définie. Outre la spéciation des métaux et leurs affinités aux ligands cellulaires, le pH influence également l'activité métabolique des cellules et la complexation des métaux avec les différents composants du milieu. Etant donné la multitude de ces facteurs, les travaux réalisés sur l'effet du pH sur la toxicité des métaux sont souvent contradictoires

Ainsi, certaines références font état d'une diminution de la toxicité du cuivre et du zinc lors d'une acidification du milieu, alors que d'autres auteurs l'ont observée lors d'une alcalinisation.

Le potentiel d'oxydoréduction détermine également la toxicité des métaux envers les champignons. Dans des conditions très réductrices, les métaux précipitent sous forme de sulfures insolubles de faible toxicité. Ce phénomène naturel constitue une détoxication chez certains champignons producteurs de sulfure d'hydrogène.

La valeur du potentiel d'oxydoréduction peut également affecter la toxicité des métaux en favorisant la prédominance des formes oxydées ou réduites de ces métaux. C'est par exemple, le cas du chrome qui peut exister en solution à l'état de Cr ⁶⁺ (CrO₄²⁻) ou de Cr ³⁺, la forme de Cr ⁶⁺ étant nettement plus toxique⁺ envers les organismes vivants que la forme réduite Cr ³.

Enfin, plusieurs métaux exercent souvent une toxicité plus prononcée qu'un métal isolé. Cette observation peut être expliquée par l'addition des effets toxiques des différents métaux.

4.3 Interactions entre les métaux et les sédiments

Dans les écosystèmes aquatiques, la qualité de l'eau est largement régulée grâce à la présence des sédiments. Ces derniers sont capables de fixer des quantités importantes de polluants mais en contrepartie, ce sont de véritables réservoirs de pollution

? Formes chimiques des métaux dans les sédiments

Les métaux existent sous différentes formes chimiques dans les sédiments. Le terme de **spéciation** fait référence aux formes spécifiques dans lesquelles un élément se trouve (niveau d'oxydation, formes organométalliques,...). L'importance de la spéciation vient du fait que l'évaluation de la concentration métallique totale n'est pas suffisante pour déterminer l'impact environnemental d'un métal. En effet, l'utilisation de la concentration totale comme critère d'évaluation des effets potentiels des sédiments contaminés sous-entend que toutes les formes d'un métal ont un même impact sur l'environnement, ce qui n'est pas réellement le cas (Tessier et al. 1979).

Les métaux dissous ou échangeables avec les ions des complexes argilo-humides sont relativement facilement disponibles pour les organismes vivants.

A l'opposé, les métaux emprisonnés dans la structure cristalline silicatée des argiles sont considérés comme un non bio disponibles.

Entre ces deux extrêmes, figurent les métaux potentiellement bio-disponibles et qui globalement correspondent aux métaux liés aux carbonates, aux oxydes et aux hydroxydes de fer, aux substances humides et aux sulfures. La bio-disponibilité des métaux dans les sédiments est résumée sur le Tableau B-2.

Tableau B-2 : Bio-disponibilité des métaux dans les sédiments d'après (US Environmental Protection Agency 1991)

A. Formes bio-disponibles:

- métaux dissous
- métaux échangeables

B. Formes potentiellement bio-disponibles :

- les carbonates métalliques
- les oxydes et hydroxydes métalliques
- métaux absorbés sur ou emprisonnés dans les oxydes de fer
- métaux fortement absorbés sur ou chélatés aux substances humiques

C. Formes non bio-disponibles :

métaux emprisonnés dans la structure cristalline des argiles

Selon les changements physico-chimiques auxquels les sédiments peuvent être soumis, les métaux peuvent être sous forme mobile ou non mobile. Les conditions susceptibles de modifier la spéciation des métaux potentiellement bio disponibles dans les sédiments sont données par le Tableau B-3.

Tableau B-3 : Devenir des métaux potentiellement bio-disponibles lors du changement des conditions chimiques des sédiments

	d'après	(US Environmen	ital Protection	Agency 1991)
--	---------	----------------	-----------------	--------------

Type de métal	Condition initiale	Changement Environnemental	Résultat
Carbonates, oxydes et hydroxydes	Sels dans les sédiments	Baisse du pH	Libération des métaux avec la dissolution des oxydes
Métaux absorbés sur les oxydes de fer	Absorbés dans les sédiments	Etablissement de conditions réductrices ou acides	Les oxydes de fer deviennent instables et libèrent les métaux
Métaux chélatés aux substances humiques	Chélatés dans les sédiments		nent immobilisés quelles ons d'oxydo-réduction.
Métaux liés aux sulfures	Précipités très insolubles	Etablissement de conditions oxydantes	Les sulfures deviennent instables, s'oxydent en sulfates et libèrent les métaux

? Méthodes d'étude de la spéciation

La spéciation des métaux peut être étudiée par des méthodes physiques (diffraction par les rayons X, résonances magnétiques nucléaires, spectrométrie infrarouge,...) et par des méthodes chimiques. A l'heure actuelle, les méthodes physiques ne sont pas tout à fait au point, manquent souvent de sensibilité et nécessitent l'utilisation d'équipements analytiques lourds.

La spéciation chimique reste, par conséquent, la méthode la plus utilisée. Cette méthode, dite d'extractions séquentielles, consiste à extraire les métaux des sédiments par lavages successifs avec des réactifs de force croissante. De nombreux schémas d'extraction sont proposés. Ils diffèrent principalement par la nature des réactifs et les durées d'extraction. Cependant, les principales fractions chimiques déterminées par ces nombreux schémas d'extraction ont pour base commune les fractions définies par le protocole de Tessier et al. (1979). Ce dernier, très fréquemment utilisé dans les études de spéciation, définit cinq fractions chimiques auxquelles les métaux peuvent être associés dans les sédiments :

- ? **la fraction échangeable** correspond aux métaux lourds adsorbés sur les argiles, les matières organiques, les oxydes de fer et de manganèse.
- la fraction acido-soluble correspond aux métaux liés aux carbonates. Selon la nature des sédiments, des quantités importantes de métaux peuvent être associées à cette fraction. A ce niveau, il est souvent difficile de différencier entre les métaux liés aux carbonates et ceux liés à la fraction soluble des acides humiques et fulviques.
- ? la fraction réductible est liée aux oxydes de fer et de manganèse. Ces derniers sont à l'état de nodules ou de ciment entre les particules et sont thermodynamiquement instables dans des conditions anoxiques,
- ? la fraction oxydable correspond aux métaux liés à la matière organique et aux sulfures. A ce niveau, il est difficile de différencier la fraction liée aux sulfures de celle liée la matière organique.
- ? **la fraction résiduelle** correspond aux métaux piégés dans la matrice cristalline aluminosilicatée des minéraux primaires et secondaires.

L'extraction séquentielle des métaux est très dépendante des conditions opératoires. Les principaux paramètres déterminant l'efficacité et la reproductivité de l'extraction séquentielle des métaux sont les suivants (Morabito 1995) :

- ? les propriétés chimiques, la sélectivité et l'efficacité des réactifs d'extraction ;
- ? la séquence des étapes d'extraction ;
- ? les conditions opératoires (temps d'extraction, rapport solide/solution, mode et continuité d'agitation, etc.);
- ? les effets spécifiques de la matrice tels que la ré-adsorption et la contamination croisée.

? Les liaisons chimiques mises en jeu

L'adsorption joue un rôle très important dans les interactions entre les métaux et les sédiments. Elle implique essentiellement deux processus :

- ? L'un est lent et correspond à la diffusion du métal dans le sédiment,
- ? l'autre est relativement rapide et implique des liaisons électrostatiques ou ioniques.

La réaction de désorption/adsorption peut être partiellement réversible. La réversibilité partielle de l'adsorption est due au fait que la désorption est souvent plus lente que l'adsorption qui l'a précédée. De plus, plus le temps d'adsorption est long, plus la désorption est lente.

Les principaux facteurs qui influencent l'adsorption des métaux et des sédiments sont la concentration aqueuse des ions métalliques, la concentration de la matrice en métaux, le pH, le temps de réaction et la présence d'ions compétiteurs dans le milieu. D'autres facteurs

moins importants sont également impliqués dans l'adsorption tels que la taille des particules, la température et la concentration en matières sèches totales (MS) des sédiments.

Deux types d'adsorption existent :

- ? une adsorption non spécifique : une ou plusieurs molécules d'eau s'interposent entre le cation métallique et les groupes fonctionnels de l'adsorbant. Les liaisons mises en jeu sont faibles et donc instables. Elles sont essentiellement électrostatiques. Les cations adsorbés sont facilement échangeables. L'adsorption est liée à la surface de contact.
- une adsorption spécifique : aucune molécule d'eau n'est interposée entre le cation métallique et les groupes fonctionnels de l'adsorbant. Les liaisons mises en jeu sont plus importantes que pour l'adsorption non spécifique. Elles sont principalement covalentes ou ioniques. Contrairement au cas précédent, le complexe formé est assez stable et les cations sont fortement liés à l'adsorbant. L'adsorption est alors liée à la quantité de groupes fonctionnels par unité de surface. Sa chaleur de réaction est supérieure à celle de l'adsorption non spécifique. L'adsorption spécifique est donc prioritaire par rapport à l'adsorption non spécifique et l'élimine d'une manière partielle ou totale.

Finalement, plusieurs liaisons chimiques sont impliquées dans le processus d'adsorption. Les principales liaisons mises en jeux sont les liaisons Vander Waals, hydrogène, ioniques, de coordination et covalentes.

? Les facteurs influençant la spéciation

La spéciation des métaux lourds dans les sédiments dépend de deux grands facteurs : la composition physico-chimique des sédiments et la nature du métal en question.

a) La composition physico-chimique des sédiments

La matière organique présente des substituants (carboxyles, hydroxyles, phénoliques) ayant une grande affinité vis à vis des métaux lourds. Par ses propriétés complexantes, la matière organique peut contribuer à la solubilisation des métaux lourds. En revanche, la minéralisation et l'humification entraînent une perte de mobilité des métaux lourds. La matière organique joue donc deux rôles différents : l'un est fixateur et immobilisant, l'autre est complexant et solubilisant. Une attention toute particulière doit donc être portée sur la nature chimique et sur l'état de dégradation de la matière organique, avant de conclure sur le rôle de celui-ci au niveau de la mobilité des métaux lourds dans les sédiments.

Les argiles sont capables de retenir les cations métalliques grâce à leur capacité d'échange cationique (C.E.C.). Cette dernière augmente en fonction du degré de substitution et de l'espacement entre les feuillets. L'affinité des argiles aux métaux lourds est également accentuée par leur association aux acides humiques. L'addition d'acide humique à de l'argile pure (kaolinite) facilite l'adsorption du cadmium, en comparaison avec le témoin d'argile pure. Il semblerait donc qu'il faille distinguer la C.E.C. d'origine organique et la C.E.C. d'origine minérale si l'on veut mieux comprendre le comportement des métaux lourds dans un sédiment.

Les carbonates peuvent capter de nombreux cations mais dans des quantités moindres que les argiles minérales ou les oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse. Ces derniers présentent une grande affinité aux métaux lourds. La coprécipitation des métaux avec les hydroxydes de fer est utilisée pour l'assainissement de certains effluents. Le cuivre, le zinc, l'arsenic et le plomb sont coprécipités de manière relativement importante avec les hydroxydes de fer. Les oxydes de manganèse fraîchement précipités sont plus adsorbants

que Al(OH)₃ ou les argiles minérales. Cependant, leur pouvoir d'adsorption diminue avec leur âge.

L'adsorption des métaux sur les sulfures est très dépendante du pH et des conditions d'oxydoréduction ainsi que de leur nature. On peut classer ces éléments par ordre décroissant de leur liaison avec les sulfures : Hq>Cu>Pb>Cd>Ni>Zn

b) Propriétés physico-chimiques du milieu

La solubilité des métaux augmente dans les sédiments acides. En effet, les sites échangeables sont alors occupés par les ions H⁺, il y a donc libération des métaux lourds adsorbés. Le pH joue aussi un rôle essentiel dans l'adsorption des métaux lourds sur la matière organique et plus particulièrement, sur les acides fulviques. Plus le pH augmente, plus les fonctions carboxyliques des acides fulviques sont ionisées, et plus l'adsorption des métaux lourds sur les sites négatifs ouverts de la matière organique est facilitée. De plus la constante de stabilité des composés organo-métalliques augmente avec le pH (Juste 1988). D'une manière plus générale, le pH influence fortement les échanges comme suit :

- pH <3: aucune adsorption par échange, les ions H⁺ bloquent les sites;
- 3 < pH < 6,5 : il y a une compétition entre les ions H⁺ et l'espèce échangeable ;
- pH > 6,5 : c'est la molécule qui est échangée et non plus H⁺

Les conditions réductrices du milieu peuvent provoquer une diminution de la disponibilité des métaux lourds si la matière organique est riche en éléments soufrés. Les conditions réductrices sont étroitement liées à l'état d'oxygénation des sédiments. Selon le degré d'aérobiose de la colonne d'eau, deux couches principales peuvent être observées :

une couche aérobie qui se trouve au-dessus du sédiment et parfois, pour des milieux fortement aérés, dans une partie du sédiment. Les particules sont sujettes à la dégradation, ce qui a pour conséquence la re-solubilisation des métaux qui leur étaient associés. Les surfaces aérobies des sédiments contiennent généralement beaucoup de matières organiques ainsi que des populations microbiologiques importantes. Leur présence favorise la mobilité des métaux. En fait, d'une manière plus générale, un sédiment aérobie est plus sujet à la libération des métaux qu'un sédiment anaérobie.

Lorsque, épisodiquement, le milieu devient anoxique, de nombreux composés ou éléments tels que le fer, le manganèse et les phosphates sont échangés entre la couche anaérobie et la zone aérobie des sédiments. Ces échanges sont étroitement dépendants des conditions d'oxydoréduction du milieu,

dans des milieux très peu oxygénés tels que les canaux, les bassins d'orage ou les rivières à très faible débit, une couche anaérobie est observée. Elle peut être composée d'une partie de la colonne d'eau et du sédiment lui-même. On observe dans cette partie une forte immobilisation des métaux, surtout dans les milieux riches en soufre. La réduction des sulfates ou la méthanogénèse joue un grand rôle dans la spéciation des métaux.

La température joue sur les constantes d'équilibre des réactions qui régissent la spéciation des métaux dans leurs différentes formes chimiques. Globalement, une température du milieu élevée augmente la mobilité des métaux. Une partie des métaux solubles peut cependant être piégée ou fixée par les oxydes et les hydroxydes de fer et de manganèse présents en solution.

La présence d'autres cations semble faciliter la mobilité des métaux. Leur addition entraîne une libération des métaux par échange cationique. Le fer semble jouer un rôle primordial dans ce type de phénomène. Le manganèse pourrait avoir un effet similaire.						

ANNEXE 2B : Spécificité des sédiments et des opérations de curage

Description des milieux et des opérations

1. Caractérisation des sédiments en place

Une méthodologie de caractérisation des sédiments en vue d'un curage est en cours de réalisation dans le cadre du comité technique national sur la gestion des sédiments. La maîtrise d'ouvrage en est assurée par la Compagnie Nationale du Rhône qui en a confié la réalisation à Tauw environnement. En attendant les résultats de cette étude disponibles pour le 3° trimestre 2001, voici quelques données à considérer.

? Connaissance détaillée du site

L'historique du site et de son environnement seront particulièrement détaillés pour les points suivants :

- ? caractère urbain et industriel actuel et historique du site : La présence d'industries polluantes, de points de rejets particuliers, ... seront listés de manière exhaustive.
- ? Utilisation actuelle et historique du site : Les différentes exploitations du site (agricole, industrielle (pompage), commerciale (transport de matières potentiellement polluantes, ...) seront recensées.
- ? Suspicion de pollutions antérieures (type, origine, manifestations principales),
- ? Campagnes préalables d'analyses (recherche bibliographique).

? Méthodologie d'échantillonnage

Il faut cibler le plus précisément possible les éléments qui devront être recherchés afin de réaliser un plan d'échantillonnage correct. En effet, si les échantillons ne sont pas représentatifs de l'ensemble des sédiments, l'EDR ne sera pas représentative du site

Un plan d'échantillonnage préalable à un projet de curage et à une EDR doit comprendre les éléments suivants.

- ? Les types de prélèvements (représentatifs de la hauteur de sédiments à curer) ;
- ? Les techniques de prélèvements retenues : bennes, dragues à main, carottiers,
- ? La constitution des échantillons représentatifs : épaisseur à "échantillonner", constitution de l'échantillon moyen,
- ? La description et les analyses visuelles des échantillons.

? Déterminations analytiques

Les différents paramètres suivants peuvent être analysés :

? Caractéristiques physiques :

- matière sèche,
- granulométrie complète (tamis et laser pour la fraction inférieure à 35 μm sur un échantillon non décarbonaté),
- densité (permet d'établir la conversion m³/tonne pour le devenir des sédiments).
- vitesse de sédimentation (nécessaire pour le dimensionnement d'un éventuel bassin de décantation dans le cas d'un curage hydraulique)).

? Caractéristiques chimiques de routine :

- Carbone Organique,
- Nutriments : Azote organique (NTK), Phosphore...
- Hydrocarbures totaux (HCT),
- Sulfures,
- Teneur en carbonate ...

Caractéristiques chimiques plus spécifiques :

- Micro-polluants organiques: la liste de polluants organiques dépend des résultats de l'étude historique. Si leur présence est suspectée, peuvent être également analysés dans cette phase d'étude, les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), Polychlorobiphényles (PCB), les pesticides, AOX,... Il est important de demander au laboratoire le taux d'extraction de ces composés. Pour les composés organiques, il est intéressant de réaliser en routine et sur quelques échantillons, un balayage (screening) en chromatographie suivie d'une spectrométrie de masse (GC-MS)). Ce type d'analyses, encore peu répandu, permet de réaliser de substantielles économies par la détection semi-quantitative de micro-polluants organiques.
- Lors de l'étude préalable, la liste des polluants présents a déjà été établie. Il s'agira donc de la compléter en fonction des données historiques nouvelles et/ou on pourra se contenter des polluants déjà mis en évidence en approfondissant les connaissances sur les caractéristiques chimiques de ces derniers.

? Caractéristiques biologiques :

- Une détermination de l'activité benthique doit être réalisée afin d'évaluer le degré de toxicité des sédiments sur l'écosystème. Certaines espèces sont en effet de bons marqueurs de toxicité (oligochètes, chironomes,...). Les tests écotoxicologiques normalisés peuvent être employés sous réserve de la validation des résultats obtenus.

? Caractérisation de la colonne d'eau

Des prélèvements d'eau complémentaires à ceux réalisés dans les phases d'investigations précédentes pourront être réalisés sur des profils verticaux pour la recherche des polluants incriminés et de leurs phases supports (dissous, particulaire,...).

Des profils verticaux de températures, d'oxygène, de conductivité, de potentiel rédox Eh, etc. pourront également être effectués sur l'ensemble du secteur considéré.

Ces éléments permettront d'évaluer les potentialités de remobilisation des polluants dans la colonne d'eau : par exemple dans un plan d'eau, la stratification thermique en période estivale peut induire une anoxie du fond et une réduction des phosphates ou oxydes métalliques et donc une libération des métaux dans l'eau.

? Inventaire de la flore aquatique

Une liste complète des végétaux supérieurs observés sur le secteur sera établie, avec indication de leur fréquence dans le périmètre concerné. Elle servira de base à l'évaluation patrimoniale de la flore.

? Inventaire des amphibiens

Observation directe et capture au filet trouble-eau, si des mares ou des fossés en eau sont présents dans le secteur.

? Inventaire hydrobiologique

Dans la mesure où le milieu s'y prête, l'inventaire hydrobiologique sera réalisé par prélèvement en faciès lotique et en faciès lentique (filet Surber), avec description des organismes présents dans les prélèvements et détermination des indices biotiques par faciès. D'autres méthodes existent et sont à adapter aux caractéristiques du plan d'eau (oligochètes, diatomées....).

Ces indices hydrobiologiques traduisent l'aptitude du milieu à l'installation et au développement de la vie aquatique.

2. Le curage des sédiments

Cette section présente trois techniques traditionnelles de curage (mécanique, hydraulique et pneumatique) en identifiant leurs caractéristiques et le type de risque qu'ils sont susceptibles de générer.

? Le curage mécanique

Ce curage, effectué à partir d'engins à godets qui opèrent soit depuis les berges (pelle mécanique) soit depuis la surface (pelle sur pontons, dragues à godets...), est employé dans la majorité des cas pour l'extraction de sédiments pollués.

Le curage mécanique peut engendrer, dans certains cas, une grande remobilisation des sédiments en place. Si tout ou partie de ces sédiments est polluée, les polluants peuvent se trouver à nouveau en suspension.

Pour le curage des cours d'eau et des ports fluviaux, différents types d'engins sont utilisés :

? Les pelles hydrauliques

Les pelles hydrauliques sont utilisées pour le curage de cours d'eau de faible largeur (inférieure à 15 m). Leur grande maniabilité leur permet de manœuvrer entre les arbres.

? Les pelles araignées

Ce sont des pelles qui peuvent être utilisées dans de nombreuses situations : travail à partir de la berge, du lit de la rivière, dans le cas de petites rivières ou encore de fossés. Ce genre d'engins ne permet en général pas de travailler dans des zones marécageuses ou à fort envasement.

? Les pelles à godet sur pontons

Ce sont des pelles hydrauliques montées sur des barges. Généralement légèrement plus puissantes que les pelles à godet classiques, elles permettent de travailler à 20 m de distance ou de profondeur.

? Les « amphidredges »

Cet appareil a été conçu pour travailler en rivière ou en zone marécageuse. Il possède une coque principale et plusieurs pattes mobiles munies de flotteurs (hydrauliques). Ces appareils sont amphibies, c'est à dire qu'ils peuvent effectuer sans difficultés des allées et venues de la berge à l'eau.

? L'« aquacat »

L'aquacat est un appareil intermédiaire entre la pelle araignée et l'amphidregde. Il est constitué d'un flotteur principal et de trois pattes articulées. Cet engin est idéal pour les travaux et l'entretien de cours d'eau en agglomération ou pour ceux dont l'accès par la berge est impossible. Les faibles dimension de cet appareil conduisent à ce qu'il soit souvent utiliser comme appareil d'appoint, à une pelle hydraulique, par exemple.

? Les « draglines »

Ce sont les pelleteuses les plus couramment utilisées en France pour le curage de cours d'eau de taille moyenne (jusqu'à 150 m de largeur). Pour pouvoir utiliser ce type de matériel, les berges du cours d'eau concerné doivent être déboisées. Ce genre d'engins nécessite beaucoup de place pour manœuvrer (la flèche de l'engin pouvant atteindre 50 m). Elles nécessitent un sol stable sur lequel elles peuvent se déplacer.

? Dragues à pelle ou à cuillère

Elles sont utilisées dans des travaux de déroctage dans des roches tendres.

? Dragues à godets

Elles ne sont actuellement presque plus utilisées.

? Dragues rétrocaveuses

Elles sont utilisées pour les dragages le long des quais ou dans des zones peu accessibles.

? Dragues excavatrices sur ponton à chargement frontal

Elles conviennent bien pour le travail en zones protégées.

? Dragues à bennes traînantes

Ce type de matériel est principalement utilisé en Amérique du Nord.

? Dragues à benne preneuse

Ce type de drague est utilisé dans des dragages d'entretien sur tout type de matériaux et elle est bien adaptée à des dragages dans des zones difficiles tel le long des quais.

La turbidité engendrée par ce mode de curage est importante et il en résulte un encombrement important des fonds.

? Le curage hydraulique

Un des grands avantages de ce type de curage est la faible remise en suspension des sédiments. Par contre, ce type de curage engendre de grands volumes de d'eau avec les sédiments extraits (un volume de sédiment pour trois volumes d'eau), il faut donc prévoir un ou plusieurs bassins de décantation en aval de l'extraction et un dispositif de rejet des eaux.

? Dragues à désagrégateur à pression d'eau ou à désagrégateur rotatif

L'extraction des matériaux se fait par rotation du cutter ou par un jet d'eau sous pression. Dans les deux cas, les matériaux sont remis en suspension puis aspirés par une pompe située dans l'élinde juste derrière les têtes de désagrégation. Ces engins étant montés sur des barges ou sur châssis, leur rayon d'action est relativement important.

Un des avantages de cette technique, outre la faible remise en suspension des sédiments, est que ces engins peuvent travailler sans contact avec les berges du cours d'eau.

Par contre, un inconvénient est leur impossibilité à travailler dans des cours d'eau encombrés par la végétation (cette dernière pourrait colmater le désagrégateur ou la pompe).

? Dragues à désagrégateur horizontal

Ces dragues sont équipées de deux tarières montées sur l'extrémité d'un tube d'aspiration et destinées à s'attaquer aux sédiments. Ainsi, à chaque passage, le désagrégateur découpe les sédiments sur une largeur allant jusqu'à 2,70 m. Un bouclier est fixé au bout du désagrégateur, piégeant les matériaux remis en suspension et augmentant le rapport eau / éléments solides. Sur le bouclier peuvent être placées des dents permettant une meilleure progression dans des sédiments contenant des débris végétaux, qui doivent cependant rester en faible quantité.

Ce type de drague est très efficace dans les cours d'eau à fond plat, mais devient inefficace dans des cours d'eau à fond hétérogène.

? Dragues à désagrégateur rotatif et horizontal

Sur ce type de drague sont regroupés deux désagrégateurs différents, ce qui a pour effet d'augmenter l'efficacité de chaque engin pris séparément. Le désagrégateur horizontal est généralement placé à l'avant de la barge. Il permet ainsi de soulever et d'égoutter les sédiments avant que ceux-ci ne soient ensuite aspirés par la pompe. Par contre, le désagrégateur rotatif est utilisé en appoint pour enlever des sédiments lourds ainsi que la végétation (si elle n'est pas trop importante).

? Les pompes immergées

Le pompage des sédiments se fait à l'aide d'un agitateur rotatif. Ce type de curage peut intervenir à des profondeurs allant jusqu'à 20 m. Ces pompes sont destinées à l'extraction de sables et graviers en rivières, au pompage de sédiments, au dragage d'appontement et de port.

Ce matériel est le plus fréquemment utilisé à partir du bord des cours d'eau, par l'intermédiaire d'une grue. Si l'utilisation d'une barge est à envisager, il serait plus opportun d'utiliser une drague flottante. De plus, ce genre de matériel nécessite une source d'électricité importante à proximité de l'exploitation.

Une zone de décantation est à prévoir aussi dans ce type de curage.

? Les pompes flottantes

Ce genre de pompe est constitué d'un groupe moto-pompe monté sur un châssis tubulaire formant traîneau et muni de deux flotteurs gonflables. Le pompage s'effectue à l'aide d'une tête racleuse d'aspiration, munie d'un manche, et glissant sur la vase, la pompe suivant le travail en flottant. Les matériaux curés sont refoulés à une distance de maximum 12 m. Pour pouvoir guider correctement la tête d'aspiration, le conducteur des travaux doit impérativement se trouver dans l'eau, à coté de la pompe. La vitesse de progression est donc relativement faible.

Grâce à leur faible encombrement et à leur facilité de manipulation, ce type de pompage est idéal pour le nettoyage ou l'entretien de petits ruisseaux.

Pour le curage des ports maritimes et de deltas ou estuaires, le matériel d'aspiration diffère :

? Drague aspiratrice refouleuse stationnaire

Ce type de drague est fixé sur des câbles, des chaînes ou des pieux, et aspire par papillonnage autour de sa zone de fixation. L'efficacité du dragage peut

éventuellement être augmentée avec l'action complémentaire d'un désagrégateur. Les matériaux sont ensuite refoulés dans une conduite flottante ou des chalands.

? Drague aspiratrice au point fixe

La drague est fixée dans ce cas par ses ancres et aspire par papillonnage autour de ces derniers. Ce matériel refoule ce qu'il prélève dans un puits, dans un chaland ou dans une conduite.

? Drague aspiratrice en marche

Ces engins sont les plus utilisés pour l'entretien de chenaux d'accès. Les unités les plus modernes sont équipées de deux élindes traînantes avec des pompes immergées et sont parfois munies de désagrégateurs. La capacité de stockage de ce genre d'engin se situe entre 500 et 10 000 m³.

? Le curage pneumatique

Ce type de curage est utilisé dans les ports maritimes essentiellement. Le procédé consiste à injecter de l'air comprimé dans le sédiment pour pouvoir ensuite aspirer le mélange eau / sédiment.

? Le pré-traitement avant transport

Lors de certains curages, un pré-traitement est effectué sur le sédiment avant transport. L'objectif est de permettre la séparation des encombrants et détritus curés avec les sédiments. Les différents pré-traitements envisageables peuvent être :

- ? Le dégrillage,
- ? Le tamisage,
- ? Le réssuyage.

L'impact de ces pré-traitements et le devenir des résidus générés doit également être étudié.

3. Le transport des sédiments

Nous allons procéder à une description sommaire des principaux moyens de transport des produits de curage en essayant de dégager leurs caractéristiques et le type de risque qu'ils sont susceptibles de générer.

? Le camion

Le transfert par camion présente une grande souplesse d'utilisation et il permet l'accessibilité à tous les sites de dépôts ou de traitement. De plus, le camion constitue un mode de transport idéal entre les dépôts en rives et les dépôts terrestres ou les centres de traitement.

Le transport par camion implique des coûts relativement élevés. Les camions peuvent aussi entraîner des problèmes locaux de circulation ou encore de pollution par le bruit engendré ou les poussières. Ce type de transport implique une rupture de charge et une seconde manutention des sédiments dragués, ainsi que l'aménagement de stations de transferts.

Ses avantages: Grande souplesse d'utilisation

Ses inconvénients: Coût élevé / pollutions diverses / présence de stations de transferts

? Le pipeline

Les pipelines sont utilisés pour transporter des sédiments extraits par voie hydraulique (concentration moyenne 10 à 15% de matières sèches). Suite au curage, les sédiments sont refoulés dans des conduites permettant leur transport jusqu'à une zone de dépôt.

Ce type de transport est très économique pour des volumes importants sur des distances relativement courtes (quelques kilomètres). Aussi, placé directement à la sortie de la pompe de dragage, le pipeline assure des opérations de dragage ininterrompues et limite au minimum le nombre d'opérations de transfert. Les pipelines peuvent être utilisés pour le déchargement de barges.

Le transport par pipelines nécessite la présence de pompes de surpression pour le transport sur des distances longues ou dans le cas d'une topographie défavorable. Des blocages fréquents des conduites peuvent avoir lieu en cas de présence de matériaux grossiers. Si le pipeline est flottant, il peut engendrer le blocage de la voie navigable. En général, son utilisation est limitée au transport de volumes importants. Il faut alors prévoir de grands bassins de sédimentation en aval du dragage.

Ses avantages : Faible coût / peu de pertes / possibilité d'activité ininterrompue

Ses inconvénients : Pompes de surpression indispensables / besoin de grands bassins de décantation

? La barge et le chaland

Après curage, les sédiments peuvent être recueillis directement dans une barge (ou chaland). Le principal avantage de ce type de transport est un coût de revient, relativement faible sur de courtes distances.

Si la destination des sédiments de curage se situe sur la terre ferme, la présence ou la construction de débarcadères peut s'avérer nécessaire. Les barges ou les chalands ne peuvent être utilisées que pour des rejets en eaux libres, à part si une seconde prise en charge peut avoir lieu. De plus, des problèmes d'étanchéité peuvent subvenir avec ce type de transport.

Ses avantages : Faible coût

Ses inconvénients : Débarcadère pour le chargement-déchargement / problèmes

d'étanchéité

? La drague suceuse-porteuse

La drague suceuse porteuse implique des coûts de transport relativement faibles sur de courtes distances et elle constitue un moyen de transport idéal pour le dépôt en eaux libres.

L'utilisation de ce type de matériel implique forcément des interruptions du dragage durant le transport des sédiments et demande en plus un tirant d'eau suffisamment grand. Enfin, les dragues suceuses porteuses peuvent comporter des problèmes d'étanchéité et ne sont donc pas recommandées pour le transfert de sédiments pollués.

Ses avantages: Faible coût / idéal pour les dépôts en eaux libres.

Ses inconvénients: Dragage discontinu / mauvaise étanchéité.

? Le train

Le train constitue une solution avantageuse pour le transport de sédiments en milieu urbain. Il n'est cependant rentable que pour le transport de grandes quantités de sédiments sur des distances importantes. De plus, ce moyen de transport implique une manutention des sédiments dragués ainsi que la présence d'une voie ferrée à proximité du site d'extraction et du site de dépôt ou de traitement.

Ses avantages: Idéal pour le milieu urbain.

Ses inconvénients : Peu rentable / nécessite la présence d'une voie ferrée à proximité.

? Le convoyeur

Le convoyeur implique des coûts d'exploitations relativement peu élevés. L'utilisation de ce type de transport se limite à des distances très courtes et nécessite un investissement initial assez élevé. De plus, ce genre d'installations comporte des équipements bruyants et implique des risques importants de fuites.

4. Devenir des sédiments extraits : Solutions techniques et principaux usages

? Le régalage sur berge

Le régalage des sédiments de curage consiste à déposer les sédiments sous la forme d'une bande de 5 à 10 m de large et de 10 à 30 cm d'épaisseur. Dans certains dragages (lac, ...), les sédiments sont projetés sur les berges par un canon. Les sédiments sont régalés sur la servitude locale (code rural), ce qui permet d'effectuer le régalage des sédiments extraits sans nuisances pour l'agriculteur et de faciliter l'accès au fossé à n'importe quel moment. Dans certain cas, la présence de macrodéchets (ferrailles, verre...) peut être une gêne pour l'agriculteur.

Les principaux inconvénients de la mise en cordon des sédiments le long des cours d'eau sont :

- ? Création d'un cordon de curage riche en azote et provoquant en outre une mauvaise évacuation des eaux de ruissellement.
- ? Le régalage entraîne la création d'un néosol le long du cours d'eau.

? L'épandage

Les sédiments sont épandus sur des parcelles agricoles sur une épaisseur variant de 1 cm à 5 cm, en fonction de la nature du sol. La valeur agronomique du sédiment intervient fortement dans cette filière. Dans le cas d'un recyclage des sédiments sur les terres agricoles, un plan d'épandage peut être mis en place.

Deux usages sont possibles sur ces sites :

- ? Culture alimentaire dont pâturage,
- ? Culture non alimentaire.

? La mise en dépôt

Ce site de dépôt peut consister en un bassin creusé à même la terre sans étanchéité particulière. Ce site doit être situé dans une zone non inondable, facile d'accès et le plus proche possible du site à curer pour simplifier le transport des sédiments extraits.

Le projet de mise en dépôt doit être complété par une étude de l'usage futur du site (projet aménagement paysager, utilisation future du site).

Les usages possibles sur ces sites sont :

- ? Aménagement et entretien d'une zone de loisirs,
- ? Culture alimentaire dont pâturage,
- ? Culture non alimentaire.

? Mise en dépôt confiné

Cette solution correspond au stockage des boues sur un site étanche et imperméable (couverture argileuse et géomembrane, système de drainage pour récupérer les lixiviats pollués). La constitution de ces sites peut être la suivante :

- ? géomembrane (bentonite par exemple),
- ? drainage pour recueillir les lixiviats,
- ? matériau drainant (gravier par exemple),
- ? géotextile de couverture.

Après exploitation, les sites doivent être réaménagés (travaux paysagers) et soumis à contrôle.

? Mise en décharge

Les sédiments extraits par dragage peuvent être déposés en décharge de classe 1 et de classe 2 :

- ? La mise en décharge de classe 1 : Cette mise en décharge est réglementée par l'arrêté du 18/12/92 modifiée par l'arrêté du 18/12/94. Les sédiments extraits par curage n'apparaissent pas dans la classification de déchets acceptables par ce type de décharge (A, B, C).
- ? La mise en décharge de classe 2 : Les sédiments extraits n'apparaissent pas non plus dans la classification officielle. Leur acceptation est soumise à autorisation par les autorités de tutelle (DRIRE, ...) en fournissant une caractérisation détaillée du déchet concerné : teneur en métaux lourds, teneur en hydrocarbures, siccité, volumes à traiter.

? Réemploi des sédiments

Les sédiments extraits peuvent être utilisés à des fins diverses :

- ? Pour la confection de remblais.
- ? Pour des aménagements paysagers,
- ? Pour la production de matériaux,
- ? Remblaiement de carrière,
- ? Pour la stabilisation ou la fertilisation des sols.
- ? Pour la régénération de terrains.

Le choix de toute affectation doit être fondé sur une étude permettant d'identifier les meilleures solutions techniques possibles, économiquement réalistes et les risques pour le milieu naturel et pour l'homme.

Ce réemploi est autorisé lorsque les sédiments sont réutilisés par le propriétaire. Lorsque ceux ci sont utilisés et que le volume est supérieur à 2 000 tonnes, ils sont soumis à la réglementation carrière (rubrique 2510 de la circulaire du 23 juin 1994). Cette utilisation est donc soumise à autorisation au titre des installations classées.

? Traitement des produits de curage

Il existe plusieurs types de traitement (issus de la technologie du traitement des sols). Ces opérations sont généralement réalisées sur des aires étanches aménagées et font l'objet d'une surveillance particulière de la part des services préfectoraux. Le traitement des sédiments extraits n'est pas étudié dans les études de risques, puisqu'il s'agit là d'un risque industriel. Seul le risque résiduel du sédiment traité en fonction de sa réutilisation pourra être défini.

? Pré-traitement

Le pré-traitement a pour but de réduire le volume des sédiments pour améliorer leur qualité ou faciliter un traitement ultérieur. Ce prétraitement peut être :

- Une déshydratation par filtre presse, par centrifugation...
- Un tri granulométrique...

? Traitement chimique

Le traitement chimique a pour but soit de détruire les substances organiques, soit d'extraire ou de fixer les métaux.

? Techniques végétales

L'utilisation des plantes pour la gestion et/ou la décontamination des sites pollués notamment par les métaux est une voie nouvelle en plein essor.

Deux grands types de solution peuvent être envisagées :

- <u>La phytoextraction</u>: technique qui consiste à extraire les métaux du sol par l'utilisation de plantes accumulatrices qu'il faut ensuite éliminer.
- <u>La phytostabilisation</u>: technique qui consiste à immobiliser les métaux dans le sol à l'aide de végétaux spécifiques et ainsi empêcher toute dispersion de la pollution (érosion éolienne ou percolation).

? Traitement biologique

Ce traitement consiste en l'utilisation de micro-organismes pour dégrader les substances organiques ou pour accélérer la décomposition naturelle de contaminants organiques.

? Traitement physique

Cette technique consiste à concentrer les polluants par des procédés physiques (centrifugation, hausse de pression, filtration, pyrolyse) de manière à pouvoir ensuite mieux confiner les matières polluantes.

? Traitement par immobilisation, ou inertage

Cette technique consiste à introduire dans les sédiments pollués des liants chimiques de manière à éviter toute migration de ces derniers.

? Traitement par lavage

Cette technique n'est applicable qu'à des sédiments ayant une granulométrie suffisante (des sables).

? L'incinération

Les sédiments doivent être analysés avant d'être incinérés de manière à évaluer leur aptitude à l'incinération en particulier vis à vis des teneurs en éléments indésirables (soufre, métaux,...).

? Mise en dépôt sous eau (clapage)

Lors de certains curages (hydraulique, milieu maritime, ...), une des solutions pour le devenir des sédiments est leur mise en dépôt sous eau .

Les sédiments sont transportés et rejetés dans le milieu aquatique, soit dans une zone de grande profondeur (darse,...) en aval du cours d'eau concerné, soit en milieu maritime. L'objectif escompté est le stockage sous grande hauteur d'eau ou la dispersion des sédiments dans le milieu naturel.

Lors des dragages portuaires, le clapage peut être effectué :

- ? En bordure du littoral (bas de plage, pour aider à la lutte contre l'érosion du littoral,
- ? Au large, afin d'éviter le retour vers le littoral des sédiments dragués.

? Sédiments poussés vers l'aval Dragage à l'« américaine »

Il s'agit d'une technique qui consiste à provoquer la remise en suspension des sédiments au moyen d'une hélice ou d'air comprimé dans les cours d'eau ou chenaux à fort courant. Les sédiments sont repris dans le flux et se redéposent en aval. Cette méthode est souvent utilisée pour les sas d'entrée de port ou en amont immédiat de zone profonde.

ANNEXE 3: CAHIER DES CHARGES

Cette annexe comprend trois parties :

- ? Annexe 3A: Cahier des charges type
- ? Annexe 3B : Grille de lecture pour la validation de l'EDR
- ? Annexe 3C : Grille de lecture pour l'évaluation des offres

ANNEXE 3A: CAHIER DES CHARGES TYPE

Ce document présente le cahier des charges type pour une évaluation détaillée des risques pour la santé humaine liés à la gestion des sédiments et aux opérations de curage.

Il prend en compte toutes les situations qui peuvent être envisagées. Ainsi, sur la base du cahier des charges "type" proposé, rédigé sous un format Word, le Maître d'Ouvrage pourra rédiger son appel d'offre correspondant à sa ou ses situations à étudier en procédant de la façon suivante :

- ? compléter les objectifs de l'étude, le contexte socio-économique, géographique, et environnemental, l'usage actuel et/ou futur du site. Il suffit de sélectionner les zones colorées en bleu et de les remplacer par le texte adapté au site étudié.
- ? définir une stratégie d'échantillonnages si nécessaire.
- ? supprimer les situations, les voies d'exposition qui ne sont pas adaptées au cas étudié.
- ? Apporter toute information complémentaire relative au site (existence d'études de diagnostic, d'études d'impact, ...). Ces informations devront être résumées dans le cahier des charges d'appel d'offre, et les études listées. Elle pourront être consultées par les entreprises répondant à l'appel d'offres.

Ce cahier des charges propose également la rédaction d'articles relatifs à l'organisation de l'étude, et aux conditions financières. Le Maître d'ouvrage pourra, s'il le souhaite, scinder ce document en deux parties : une partie technique et une partie administrative.

CAHIER DES CHARGES

1. Introduction - Cadre de l'étude

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet de A compléter par le Maître d'Ouvrage.

L'interlocuteur représentant le Maître d'Ouvrage est :

M Maître d'Ouvrage Rue du Canal 59000 LILLE

Le site se situe A compléter par le Maître d'Ouvrage. Le contexte environnemental, géologique, hydrogéologique, climatique, ... est le suivant : .

L'objectif de l'étude sera d'évaluer les impacts potentiels pour la santé humaine que peuvent engendrer :

- ? La présence des sédiments pouvant présenter de fortes teneurs en métaux lourds, hydrocarbures, laissés en place au fond des cours d'eau, des fossés, des rivières, ou des étangs;
- ? Le curage des voies d'eau, suivant les techniques envisageables,
- ? Le transport des sédiments, et
- ? Le devenir des sédiments.

Les risques potentiels devront être identifiés pour chaque situation et pour le devenir de sédiments curés, du curage jusqu'à leur destination finale.

L'étude présentée devra permettre :

- ? d'identifier la pertinence de mettre en place un curage,
- ? d'identifier la méthode de curage à mettre en place par rapport aux caractéristiques des sédiments du site,
- ? d'identifier les méthodes de transport des sédiments les plus adaptées aux situations traitées,
- ? d'identifier le devenir des sédiments curés,
- de définir les objectifs de traitement, si nécessaire, pour limiter les risques liés à une destination choisie,
- ? de déterminer et de mettre en place des actions permettant de minimiser les risques d'exposition des hommes, par tout milieu de transfert, et aux différents stades d'intervention.

Les documents disponibles concernant sont les suivants et sont consultables chez le Maître d'Ouvrage :

- ? Etude historique
- ? Etude d'impact,
- ? A modifier et à compléter par le Maître d'Ouvrage....

2. Phase A : Schéma conceptuel

Le schéma conceptuel devra être établi pour chaque situation à étudier, c'est-à-dire :

- ? Le maintien des sédiments en place, ou
- ? Le curage des sédiments,
- ? Le transport des sédiments,
- ? Le devenir des sédiments curés, et
- 9 L'ensemble des situations.

A l'issue de l'étude des documents existants et des situations à étudier, un plan d'échantillonnage et d'investigations sera réalisé si nécessaire et proposé au maître d'ouvrage pour validation. Il prendra en compte la caractérisation des sédiments, la caractérisation du milieu environnant et/ou récepteur, la localisation des points de sondage, les méthodes employées (analytiques et d'échantillonnage). Cette étape devra notamment aboutir à la caractérisation du milieu "source".

La caractérisation du milieu aquatique et de l'environnement du site, des usages envisagés, devra permettre à l'évaluateur de dresser une liste exhaustive des cibles et des voies de transfert potentielles.

L'étude devra préciser :

Pour les sédiments en place :

- ? L'environnement du site (urbain, industriel, agricole, présence d'industries polluantes à proximité, les exploitations comme les pompages, présence de zones protégées...)
- L'utilisation du site (actuelle et future, canal utilisé ou non pour la navigation commerciale ou de plaisance, loisirs, présence de chasse ou de pêche, présence de puits pour l'irrigation ou l'alimentation du bétail...)
- ? Le type de méthode utilisée pour les prélèvements de sédiments représentatifs de la hauteur à curer, les avantages et inconvénients de la méthode retenue, la description visuelle et organo-leptique des échantillons
- ? Les déterminations analytiques sur les sédiments et les eaux interstitielles pourront être ciblées en fonction des études existantes : matière sèche, granulométrie, densité, COT, hydrocarbures totaux, HAP, Azote, phosphore, sulfures, carbonates, métaux (As, Pb, Cd, CrIII et CrVI, Cu, Hg, Ni, Se, Zn). Les paramètres supplémentaires à analyser seront choisis avec soin et expliqués en fonction de l'étude bibliographique réalisée.
- ? Une caractérisation de la colonne d'eau avec analyse des micro-polluants, de la teneur en oxygène dissous, du potentiel Redox.
- ? La pertinence de réaliser un inventaire de la flore aquatique et de la faune benthique sera déterminée.
- ? L'identification des voies de transfert, quelles soient directes, ou indirectes (par les eaux superficielles, souterraines, la flore ou la faune).
- ? L'identification des cibles terminales ou intermédiaires en fonction des usages recensés : type de population présente (sensible, peu sensible), durée probable d'exposition, ..

Le schéma conceptuel du site devra être illustré par une représentation graphique des interactions identifiées entre les trois termes source-cible-transfert.

Pour le curage :

- ? L'environnement du site (urbain, industriel, agricole, présence d'industries polluantes à proximité, les exploitations comme les pompages, présence de zones protégées...)
- Le type de curage envisagé d'un point de vue technique (hydraulique, pneumatique ou mécanique) et économique (partiel, total, mise en chômage du canal)
- ? La nature du cours d'eau (débit, profondeur de l'eau, ...)
- ? La caractérisation des sédiments extraits en particulier leur teneur en eau, la teneur en matière organique, le potentiel redox, la granulométrie, la présence et la nature de polluants (polluants organiques, métaux, spéciation de certains métaux, ...). Des essais en laboratoire pourront être proposés.
- L'identification des voies de transfert, qu'elles soient directes ou indirectes (par les eaux superficielles avec la remise en suspension, souterraines, la flore ou la faune). Les possibilités de transformation des substances présentes dans les sédiments liées aux conditions physico-chimiques modifiées pendant les opérations de curage, les phénomènes de désorption / adsorption, devront être identifiés.
- ? L'identification des cibles terminales ou intermédiaires en fonction des usages recensés : type de population présente (sensible, peu sensible, ouvriers, riverains), durée probable d'exposition, ...

Le schéma conceptuel du site devra être illustré par une représentation graphique des interactions identifiées entre les trois termes source-cible-transfert.

Pour le transport des sédiments :

- ? Type de transport envisagé (voie routière, par bateau ou barge, par pipelines, par train, par drague ou convoyeur): la dispersion des sédiments et donc des polluants pendant le transport devra être évaluée.
- ? La caractérisation des sédiments transportés : il sera important de caractériser la transformation des polluants induite par leur transport, par exemple en analysant les sédiments avant et après leur transport. Les hypothèses formulées devront être justifiées. Des essais de laboratoire pourront être proposés par l'entreprise.
- ? Le risque lié à un accident (fuites, barge qui coule) devra être évalué.
- L'identification des voies de transfert, qu'elles soient directes ou indirectes (par les eaux superficielles avec la remise en suspension, souterraines, la flore ou la faune). Les possibilités de transformation des polluants liées aux conditions physico-chimiques modifiées pendant le transport (assèchement des sédiments, oxydation, biodégradation des substances organiques) devront être identifiées.
- ? L'identification des cibles terminales ou intermédiaires en fonction des usages recensés : type de population présente (sensible, peu sensible, ouvriers, riverains à proximité de chantier), durée probable d'exposition, moyens de protections mis en œuvre.

Le schéma conceptuel du site devra être illustré par une représentation graphique des interactions identifiées entre les trois termes source-cible-transfert.

Pour le devenir des sédiments curés : la liste ci-après devra être adaptée par le Maître d'Ouvrage aux devenirs envisagés

? Le type de destination envisagé; il conditionne les voies de transfert et d'exposition qui seront étudiées.

- L'environnement du site récepteur (urbain, industriel, agricole, géologie, hydrogéologie, présence d'industries polluantes à proximité, les exploitations comme les pompages, présence de zones protégées...).
- L'utilisation du site récepteur (actuelle et future, canal utilisé ou non pour la navigation de type commerciale ou de plaisance, loisirs, présence de chasse ou de pêche, présence de puits pour l'irrigation ou l'alimentation du bétail...). La possibilité d'un usage pour des cultures alimentaires ou des pâturages, le régalage sur berges ou encore la remise en suspension.
- L'éventuel traitement des boues avant leur réemploi : dans ce cas les transformations physiques et chimiques des sédiments liées au traitement devront être identifiées.
- La réalisation en laboratoire de simulations du comportement des sédiments dans le site récepteur, en prenant compte le mode de curage et de transport.
- L'identification des voies de transfert, qu'elles soient directes ou indirectes (par les eaux superficielles avec remobilisation des polluants et leur migration par les eaux souterraines par lixiviation, par la flore ou la faune par accumulation de polluants dans les organismes vivants et consommation par l'homme). Les possibilités de transformation des polluants liées aux conditions physico-chimiques du milieu récepteur (eau dans le cas d'une remise en suspension, d'un dépôt hors d'eau, ou de la présence d'un confinement total ou partiel, ...) devront être identifiées.
- L'identification des cibles terminales ou intermédiaires en fonction des usages recensés : type de population présente (sensible, peu sensible, usagers du site (cas d'une base de loisirs, riverains, visiteurs du site, employés), durée probable d'exposition, moyens de protection mis en œuvre. Les cibles intermédiaires devront être examinées et la pertinence de leur étude approfondie déterminée.

Le schéma conceptuel du site devra être illustré par une représentation graphique des interactions identifiées entre les trois termes source-cible-transfert.

Un schéma conceptuel devra être réalisé pour la succession des situations.

Phase B : Evaluation détaillée des risques 3.

L'évaluation détaillée des risques sera réalisée conformément aux principes décrits dans le "Guide Méthodologique d'Evaluation Détaillée des Risques liés à la Gestion des Sédiments et des Opérations de Curage".

Elle sera basée sur le(s) schéma(s) conceptuel(s) défini(s) pour chaque situation dans la Phase A. Elle sera réalisée pour chaque situation identifiée.

Elle reprendra la définition (par rapport aux données nécessaires à l'estimation des doses d'exposition) des termes sources, des termes cibles et des termes transfert :

- Le terme Source devra être défini et précisé par rapport aux substances présentes (teneurs, les caractéristiques chimiques et physiques), et au milieu concerné (substances sous forme dissoute, substances adsorbées sur des particules, pH du milieu, ...). Le choix des substances retenues devra être explicité sur la base de critères de sélection justifiés par rapport aux voies de transfert probables.
- Le terme Cible sera identifié en tant que cible terminale (l'homme ou ressources en eau) ou en tant que cible intermédiaire (eaux, végétaux, animaux pouvant être consommés). L'identification des cibles potentielles sera réalisée à l'aide du recensement des usages

de l'eau, de la sensibilité de celles-ci. Les paramètres physiologiques pris en compte seront <u>expliqués et justifiés par rapport aux usages défin</u>is dans la Phase A.

? Le terme transfert sera considéré par rapport aux expositions directes de l'homme et aux expositions indirectes induisant la présence d'un récepteur intermédiaire et de plusieurs transferts successifs. L'évaluateur s'attachera à lister et étudier de façon la plus exhaustive possible les transferts probables. Le choix des transferts pris en compte sera justifié sur la base des usages actuels et futurs. A ce stade de l'étude, seront identifiés l'ensemble des transferts qui doivent être modélisés et ceux qui peuvent faire l'objet de mesures.

Cette étape sera réalisée pour chaque situation (sédiments en place, curage partiel ou total, transport et devenir) indépendamment les unes des autres, et pour un ensemble de situations successives.

? La caractérisation de l'exposition

La caractérisation de l'exposition devra préciser les points suivants :

- ? L'identification des points d'exposition. Les points seront identifiés de manière exhaustive.
- L'évaluation des concentrations aux points d'exposition. Le choix de la mesure directe ou de la modélisation de la concentration d'exposition sera expliqué. Les paramètres de caractérisation du transfert seront discutés, ainsi que le choix du modèle éventuellement utilisé (en précisant les limites du modèle).
- ? L'évaluation des doses d'exposition. L'ensemble des paramètres physiologiques appliqués et les durées et temps d'exposition pour chaque population identifiée devront être justifiés par rapport aux usages.

L'ensemble des calculs intermédiaires devra être fourni.

? La caractérisation de la toxicité des substances

Cette étape de recherche et de choix de données toxicologiques sera réalisée en fonction des effets qu'engendrent la substance (potentiel dangereux), en particulier les effets cancérigènes.

Les données toxicologiques choisies seront les plus adaptées aux usages définis dans la phase A. La donnée toxicologique retenue pour une substance pourra être différente en fonction du mode l'absorption et de l'usage (en particulier la durée d'exposition de la cible).

Les sources utilisées (bases de données) seront précisées et une évaluation critique des choix sera effectuée. Elle sera en particulier basée sur des facteurs de sélection qui seront justifiés, conformément au guide méthodologique.

? La caractérisation du risque

Les risques liés aux effets à seuil et aux effets sans seuil seront distingués. Une attention particulière sera accordée aux effets multiples et cumulatifs. L'expression du risque sera quantitative et les valeurs seront comparées à des niveaux de risques jugés acceptables.

La caractérisation des risques sera réalisée par situation et pour la chaîne des situations identifiées dans la Phase A.

? L'évaluation des incertitudes et de sensibilité

Une attention particulière sera apportée à cette partie. L'évaluation des incertitudes sera réalisée selon une démarche critique des points suivants :

- Le choix des cibles, des sources et des voies d'exposition
- L'estimation des incertitudes liées à l'utilisation de modèles mathématiques pour le transfert des substances chimiques entre deux milieux ou dans un même milieu.
- Le choix des données toxicologiques par rapport à l'exposition modélisée
- ? Une estimation qualitative de la sur-estimation ou de la sous-estimation du risque par rapports aux hypothèses proposées.

Conclusions - Recommandations

Cette étape de l'évaluation consiste à définir les moyens à mettre en œuvre afin que les risques identifiés soient compatibles avec l'usage ou les usages définis. Elle devra permettre en particulier:

- D'identifier les solutions pour limiter les risques chimiques,
- De proposer la mise en place de servitudes ou de restrictions d'usage,
- D'aborder l'aspect technique et économique des solutions proposées.

4. Phase C/D: Documents à fournir

Les documents à transmettre au maître d'ouvrage sont les suivants :

- Une proposition de plan d'investigations (si nécessaire) et de la synthèse des études déjà réalisées pour validation par le Maître d'Ouvrage (1 exemplaire).
- Un rapport intermédiaire en deux exemplaires comprenant une description complète du site et de son environnement, des investigations qui y ont été menées, les plans de localisation des investigations, des méthodes de caractérisation et d'analyses employées, des analyses effectuées, des résultats d'analyse et des substances chimiques présentes sur le site, des difficultés éventuellement rencontrées, la définition des usages actuels et futurs envisagés, l'identification et la justification des cibles potentielles, la description des modes de transfert des polluants vers les cibles.
- Un rapport final, transmis en trois exemplaires, devra comprendre les résultats de la phase A (établissement du schéma conceptuel), la justification des choix entrepris (substances chimiques, cibles, voies de transfert, données toxicologiques, la quantification des doses journalières selon les différents modes d'exposition, la description du modèles utilisé, ses limites et incertitudes, les résultats en terme de risque, l'estimation des incertitudes liées aux résultats, l'analyse de sensibilité, les préconisations quant à la gestion future du site.

? Une note de synthèse (résumé non technique) transmis en deux exemplaires papier et un exemplaire reproductible, de 10 pages maximum expliquant les objectifs, les tenants et les aboutissants de l'étude, reprenant le schéma conceptuel sous forme graphique. Cette note pourra être transmise à des personnes non averties

Les graphiques, schémas, plans seront tout particulièrement appréciés.

Les rapports seront transmis au minimum 5 jours avant les réunions de présentation des résultats.

5. Phase E : Programme de réunions

Des réunions seront programmées à l'issue de chaque phase. Leur organisation (envoi de convocation au moins 10 jours avant la date fixée), la rédaction des compte-rendus et leur diffusion est à la charge de l'entreprise mandatée :

- ? Une réunion de présentation du plan d'échantillonnage.
- ? Une réunion de présentation du schéma conceptuel (Phase A) tel qu'établi pour la caractérisation des risques. Il reprendra la synthèse des documents existants, de l'étude des situations, un plan des investigations réalisées, la liste des analyses et la forme graphique du schéma conceptuel.

La Phase B ne pourra être engagée qu'après validation de la Phase A par le maître d'ouvrage.

? Une réunion de présentation de la Phase B, évaluation détaillée des risques pour la santé humaine, avant l'édition du rapport final. Cette réunion devra permettre la présentation et la discussion des résultats, la gestion des risques telle qu'elle pourra être proposée au maître d'ouvrage.

Des réunions complémentaires pourront être demandées à l'Entreprise mandatée par le maître d'ouvrage pour l'assistance vis-à-vis de l'administration ou pour des réunions publiques. Ces réunions seront budgétées de façon forfaitaire dans le bordereau des coûts unitaires.

6. Confidentialité

Toutes les informations remises au maître d'ouvrage, les documents ainsi que les résultats de la synthèse ne pourront faire l'objet d'une diffusion à des tiers par l'entreprise sous quelque forme que ce soit et pour quelque motif que ce soit.

Toute publication (publicité, presse, vidéo, ...) envisagée par l'entreprise pour son propre usage devra faire l'objet d'une autorisation préalable formelle de la part du maître d'ouvrage.

7. Contenu de la proposition

Les offres devront préciser les points suivants :

? Descriptif des méthodes utilisées (prélèvements, méthodes d'analyses, logiciels de transfert utilisés...),

- Planning des travaux et des réunions prévues avec le maître d'ouvrage,
- ? Le bordereau des coûts unitaires rempli.
- ? La liste des éventuels sous-traitants, leurs agréments et compétences,
- ? Le nombre de réunions prévues,
- ? Un planning prévisionnel,
- ? Le ou les lieux où sera réalisée l'étude.

8. Rémunération

Les prestations seront forfaitaires et rémunérées à réception des documents précités :

? ...

Les paiements seront effectués sur l'établissement d'une facture sur chaque phase. La facture devra comporter les références de la commande ainsi que le détail des quantités et des prix unitaires.

9. Durée de l'étude et délais

Les délais, à compter de la notification de la commande sont :

- ? Phase A: Elaboration du(des) schéma(s) conceptuel(s): 10 semaines
- ? Phase B : Evaluation détaillée des risques pour la santé humaine : 8 semaines
- ? Phase C: Remise du rapport final: 2 semaines

Si les délais précisés ci-dessus sont dépassés, des pénalités de retard pourront être appliquées.

10. Pénalités

? Pénalités de retard

Le titulaire est passible de pénalités en cas de dépassement des délais d'exécution de ses prestations; Ces délais sont prolongés en cas de retard imputable au maître d'Ouvrage ou sur accord de celui-ci.

Le retard commence à partir des dates définies dans l'article 3.6 du présent document.

Le taux de pénalité pour retard de livraison est fixé à 0,5% du montant de la rémunération globale par jour ouvré de retard. Le montant des pénalités est limité à 10 % du montant total du marché (le CRGPI fixe les modalités suivantes :).

Celles-ci sont alors notifiées au titulaire par lettre recommandée avec accusé de réception.

? Pénalités de contrat d'engagement de résultats

Ces pénalités s'appliquent sur l'ensemble de la mission dans le cas où la mission ne serait pas menée à terme, dans le cas où elle ne serait pas menée en conformité avec le présent cahier des charges.

Cette pénalité sera comprise entre 6 et 50% de la totalité du montant global du marché.

11. Bordereau des coûts unitaires

Le bordereau des coûts unitaires joint doit être rempli de manière forfaitaire.

Bordereau des coûts unitaires

Phase	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire (FF.HT)	Coût (FF.HT)
Α	Analyse des situations et établissement du				
	schéma conceptuel				
	Etude des documents existants	Forfait	1		
	Présentation d'un plan d'échantillonnage et d'analyse	Forfait	1		
	Investigations (1)		?		
	Analyses chimiques (2)		?		
	Analyses particulières (physiques, essais)		?		
	Schéma conceptuel (1 par situation)	/unité			
	Rapport intermédiaire	forfait	2		
	Exemplaire supplémentaire	forfait			
	Total Phase A				
В	Evaluation détaillée des risques				
	Validation des informations du schéma conceptuel	Forfait			
	Quantification des risques (pour chaque situation)	/situation			
	Analyse des résultats et gestion des risques	forfait			
	Rapport intermédiaire	forfait	2		
	Exemplaire supplémentaire	forfait			
	Total Phase B				
С	Rapport final	Forfait	3		
D	Note de synthèse	Forfait	3		
Е	Réunions				
	Réunion de Phase A		1		
	Réunion de Phase B		1		
	Réunion de présentation finale				
	Réunion publique				
	Réunion supplémentaire				
F	Autre				
	Total de la prestation				

- (1) Le nombre d'investigations prévues, les méthodes et modes d'investigations préconisés, le nombre d'échantillons prélevés par milieux, seront précisés dans le corps de la proposition.
- (2) Le nombre d'analyses, les méthodes de laboratoire, les composés chimiques recherchés, les analyses physiques ou les essais de faisabilité seront détaillés dans la proposition.

ANNEXE 3B : GRILLE DE LECTURE POUR LA VALIDATION DE L'EDR

Cette grille de lecture a été établie dans le but d'aider à la lecture du guide méthodologique ou de l'étude détaillée des risques réalisée. Elle doit permettre de valider l'étude, c'est-à-dire de vérifier que l'étude est en accord avec la méthodologie adoptée par l'Agence de l'Eau Artois Picardie. Les points à examiner concernent :

- 1. l'adaptation à la démarche proposée et l'exhaustivité de l'étude,
- 2. la spécificité et l'adéquation de l'étude au cas traité,
- 3. la validité des hypothèses (elles ne doivent pas conduire à une sous-estimation du risque),
- 4. la qualité de l'étude (références claires et précises, explication en détail du raisonnement suivi).

La grille se présente sous forme de questions qui s'appliquent aux différentes étapes de l'évaluation des risques. Les réponses attendues peuvent être de quatre natures :

- ? Réponse positive : cocher la case "OUI"
- ? Réponse négative : cocher la case "NON"
- ? Réponse négative, mais qui a été justifiée par l'évaluateur : il suffira dans ce cas de mentionner les pages ou les références des paragraphes relatives aux explications dans la case notée "NON justifié".
- ? Certaines peuvent ne pas s'appliquer exactement au cas traité. Pour les questions qui ne s'appliquent pas, la case "NA" sera cochée.

Si l'étude a été réalisée dans de bonnes conditions et si elle correspond aux exigences de la méthodologie, la majeure partie des réponses doivent être positives.

Dans le cas où les résultats montrent plus de 30% de réponses négatives ("NON"), la validité de l'étude pourra être remise en cause.

		OUI	NON	NON justifié	NA
1	Démarche générale de l'étude				
1.1	Le principe de précaution est-il respecté ? (démarche sécuritaire)				
1.2	L'étude reste-t-elle proportionnée à l'importance de la pollution et à son incidence prévisible ? (principe de proportionnalité)				
1.3	L'étude réalisée correspond-elle aux caractéristiques et à l'usage du site ? (principe de spécificité)				
1.4	La démarche suivie au cours de l'étude, les hypothèses et les outils utilisés sont-ils clairement explicités tout au long de l'étude ? (principe de transparence)				
1.5	Les informations disponibles (données historiques, de l'étude d'impact, du diagnostic) sont-elles exploitées ?				
	TOTAL /5				

		OUI	NON	NON justifié	NA
2	Définition et caractérisation de la source				
2.1	La liste des substances recherchées dans la source correspondelle aux résultats suspectés ?				
2.2	Les critères de sélection des substances sont-ils clairement identifiés et définis a priori ?				
2.3	Les résultats analytiques obtenus sont-ils présentés avec la limite de détection des analyses ?				
2.4	Le bruit de fond est-il caractérisé ?				
	TOTAL /4				

		OUI	NON	NON justifié	NA
3	Caractérisation de la cible				
3.1	La population (les cibles potentielles) en contact avec le milieu ou les milieux pollués par des substances issues des sédiments est-elle correctement identifiée ?				
3.2	Les usages futurs du site et leur implications (évolution possible) sont-ils connus et pris en compte ?				
3.3	Dans le cas particulier d'un dépôt de sédiments, l'utilisation future prévisible du site a-t-elle été identifiée (activités récréatives, activités agricoles) ?				
3.4	L'usage éventuel des sédiments est-il identifié ?				
3.5	Les structures sensibles (écoles, hôpitaux, maisons de retraite, camping) présentes à proximité des sédiments sont-elles recensées ?				
3.6	Les puits d'alimentation en eau potable sont-ils recensés ?				
3.7	Les puits privés ou industriels déclarés sont-ils recensés ?				
3.8	L'usage des puits privés ou industriels est-il identifié ?				
3.9	L'usage des eaux de surface (baignade, activités de loisirs, pêche, etc) est-il identifié ?				
3.10	Les forages agricoles pour l'irrigation sont-ils recensés?				
3.11	Des puits d'alimentation pour le bétail ont-ils été recensés?				
	TOTAL /11				

		OUI	NON	NON justifié	NA
4	Evaluation des transferts				
4.1	Les voies de transfert retenues sont-elles explicitées ?				
4.2	La liste des voies de transfert des substances est-elle exhaustive ?				
4.3	Le choix des voies de transfert retenues est-il justifié ?				
4.4	Tous les transferts retenus sont-ils étudiés, soit par la mesure, soit par la modélisation ?				
4.5	La provenance des informations et des données utilisées est-elle précisée ?				
	Etude des transferts par la mesure				
4.6	Le nombre de mesures effectuées est-il suffisant pour considérer que les données obtenues sont représentatives du cas traité ?				
4.7	A-t-on un ordre de grandeur des variations de mesure liées à l'échantillonnage ?				
4.8	La limite de détection est-elle précisée ?				
4.9	Tous les choix effectués ont-ils été clairement expliqués ?				
	Etude des transferts par la modélisation				
4.10	Le choix du modèle est-il expliqué ?				
4.11	La méthode de calcul est-elle décrite ?				
4.12	Les hypothèses retenues pour la construction du modèle sont- elles explicitées et justifiées ?				
4.13	Les simplifications introduites mènent-elles à une représentation correcte et suffisante des phénomènes ?				
	Utilisation des données bibliographiques pour l'étude des transferts				
4.14	Tous les choix de données bibliographiques ont-ils été explicités ?				
	TOTAL /14				

		OUI	NON	NON justifié	NA
5	Estimation de l'exposition				
5.1	Toutes les voies d'exposition retenues lors de l'identification des cibles sont-elles modélisées ?				
5.2	Les scénarios d'exposition ont-ils été clairement définis (définition dans l'espace, le temps, vis-à-vis des habitudes de vie et de consommation) ?				
5.3	Le choix du modèle d'estimation des doses d'exposition est-il explicité ?				
5.4	La méthode de calcul des doses est-elle décrite ?				
5.5	Les hypothèses retenues pour sa construction ont-elles été explicitées et justifiées ?				
5.6	Les simplifications introduites mènent-elles à une représentation correcte et suffisante des phénomènes ?				
5.7	La fréquence et la durée d'exposition sont-elles clairement définies pour chaque cible et chaque scénario d'exposition ?				
5.8	La distinction entre expositions aiguë, subchronique et chronique est-elle effectuée ?				
5.9	Les doses d'exposition sont-elles calculées pour chaque type de populations (sensibles et non sensibles) ?				
5.10	Le choix des données intégrées dans le modèle concernant la caractérisation des cibles est-il expliqué et justifié ?				
5.11	La provenance des informations et des données utilisées a-t-elle été précisée ?				
	TOTAL /11				

		OUI	NON	NON justifié	NA
6	Evaluation de la toxicité des substances				
6.1	Les substances prises en compte et étudiées sont-elles présentées selon les classifications internationales (IARC, EPA, Union Européenne,) ?				
6.2	Les valeurs toxicologiques de référence ont-elles été recensées pour chaque substance ?				
6.3	L'origine des valeurs est-elle précisée ?				
6.4	Les unités des valeurs sont-elles précisées ?				
6.5	La valeur toxicologique choisie a-t-elle été établie pour une durée d'exposition qui correspond à la durée de l'exposition dans le cas traité ?				
6.6	La valeur toxicologique établie pour la voie orale est-elle bien associée à la dose d'exposition orale ?				
6.7	La valeur toxicologique établie pour l'inhalation est-elle bien associée à la dose d'exposition par inhalation ?				
6.8	La valeur toxicologique choisie correspond-elle au type de dose (administrée ou absorbée) calculée dans l'étude ?				
6.9	Les valeurs toxicologiques ont-elles été sélectionnées selon des critères fixés a priori et constants ?				
6.10	Les valeurs établies à partir d'études sur l'homme ont-elles été privilégiées ?				
6.11	La distinction entre toxicités aiguë, subchronique et chronique est-elle effectuée ?				
6.12	Les facteurs d'incertitude (lors des extrapolations inter-espèces / inter-voies) des valeurs toxicologiques sont-ils présentés ?				
	TOTAL /12				

		OUI	NON	NON justifié	NA
7	Caractérisation et gestion du risque				
7.1	La méthode de calcul des risques est-elle présentée et expliquée ?				
7.2	Le calcul des risques a-t-il été effectué à partir des données toxicologiques sélectionnées et des doses d'exposition estimées ?				
7.3	Les risques sont-ils calculés pour chaque substance, chaque voie d'exposition et chaque type de cible ?				
7.4	La distinction entre risques aigu, subchronique et chronique est- elle effectuée ?				
7.5	Les risques obtenus pour chaque substance sont-ils sommés individuellement par substance pour toutes les voies d'exposition ?				
7.6	Les risques obtenus sont-ils sommés pour toutes les substances ?				
7.7	Les résultats obtenus sont-ils cohérents avec les données ?				
7.8	Des moyens de réduction des incertitudes sont-ils proposés, voire mis en œuvre ?				
7.9	Des mesures de réduction des risques sont-elles préconisées ?				
7.10	Les incertitudes sont-elles ensuite réduites au maximum ?				
	TOTAL /10				

RESULTATS	OUI	NON	NON justifié	NA
TOTAL GENERAL /63				
Total exprimé en pourcentage	%	%	%	%

ANNEXE 3C : GRILLE DE LECTURE POUR L'EVALUATION DES OFFRES

Cette grille de lecture a été établie dans le but d'aider à la lecture des offres reçues en réponse au cahier des charges pour l'étude détaillée des risques liée aux sédiments. Elle doit permettre de guider le maître d'ouvrage dans sa sélection du prestataire qui réalisera l'étude.

Les points à examiner concernent :

- 1. L'adaptation à la démarche proposée et l'exhaustivité de l'étude,
- 2. La démarche envisagée pour établir le schéma conceptuel de toutes les situations à étudier,
- 3. Les modèles utilisés pour l'estimation des risques
- 4. L'adéquation entre le contenu de l'étude et son coût prévisionnel.

La grille se présente sous forme de questions qui s'appliquent aux différentes étapes de l'évaluation des risques. Les réponses attendues peuvent être de quatre nature :

- ? Réponse positive : cocher la case "OUI"
- ? Réponse négative : cocher la case "NON"
- ? Réponse négative, mais qui a été justifiée par l'évaluateur : Il suffira dans ce cas de mentionner les pages ou les références des paragraphes relatifs aux explications dans la case notée "NON justifié".
- ? Certaines questions peuvent ne pas s'appliquer exactement au cas traité. Alors, la case "NA" sera cochée.

Si l'offre a été réalisée conforme au cahier des charges, la majeure partie des réponses doivent être positives.

Dans le cas où les résultats montrent plus de 30% de réponses négatives ("NON"), le contenu de l'offre devra être revu.

ANNEXE 3C GRILLE DE LECTURE POUR EVALUATION DES OFFRES

		OUI	NON	NON justifié	NA
1	Objectifs de l'étude				
1.1	Les documents mis à la disposition par le maître d'ouvrage ont-ils été consultés ?				
1.2	Les objectifs fixés par le maître d'ouvrage ont-ils été considérés ?				
1.3	Les situations que le maître d'ouvrage souhaite étudier ont-elles toutes été envisagées ?				
	TOTAL /3				

		OUI	NON	NON justifié	NA
2	Définition et caractérisation des sédiments				
2.1	Les méthodes d'investigations sont-elles définies ?				
2.2	Le nombre de prélèvements prévus et leur localisation est-il précisé ?				
2.3	Les analyses à réaliser sont-elles justifiées ?				
2.4	Les méthodes d'analyses sont-elles mentionnées ?				
2.5	Les sous-traitants éventuels (nom et certification du laboratoire d'analyses) sont-ils précisés ?				
	TOTAL /5				

ANNEXE 3C GRILLE DE LECTURE POUR EVALUATION DES OFFRES

		OUI	NON	NON justifié	NA
3	Evaluation des risques				
3.1	Les cibles potentielles principales en contact avec le milieu ou les milieux pollués par des substances issues des sédiments sont-elles identifiées ?				
3.2	Les types de transfert possible ont-ils été identifiés ?				
3.3	Le moyen d'étude prévu pour chaque type de transfert est-il précisé et explicité ?				
3.4	Les moyens d'estimation des risques (choix des modèles d'estimation de l'exposition et de calcul du risque, utilisation des mesures du diagnostic) sont-ils précisés ?				
3.5	Est-il prévu d'évaluer les incertitudes ?				
3.6	Les moyens d'évaluation des incertitudes sont-ils mentionnés ?				
3.7	Des comparaisons entre les valeurs mesurées et celles modélisées sont-elles prévues?				
3.8	Des moyens pour réduire les incertitudes sont-ils prévus?				
3.9	Les bases de données qui seront consultées sont-elles mentionnées ?				
	TOTAL /9				

		OUI	NON	NON	NA
		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •		justifié	
4	Documents contractuels				
4.1	Les documents de réponse à l'offre sont-ils fournis ?				
4.2	Un planning est-il fourni avec l'offre ?				
4.3	Les documents à remettre au maître d'ouvrage (rapports intermédiaires et finaux) sont-ils mentionnés ?				
4.4	Le nombre de réunions prévues est-il mentionné ?				
4.5	L'organisation des réunions est-elle à la charge du bureau d'études ?				
4.6	Les termes et conditions financières sont-elles respectées ?				
4.7	Les clauses de confidentialité sont-elles acceptées ?				
4.8	Le bordereau des coûts unitaires est-il rempli ?				_
	TOTAL /8				

RESULTATS	OUI	NON	NON justifié	NA
TOTAL GENERAL /25				
Total exprimé en pourcentage	%	%	%	%