



## BENCHMARKING DES TECHNIQUES DE GESTION DES SOLS POLLUES

### Dans quels buts traiter les sols pollués ?

En accord avec les principes des outils méthodologiques du MEEDDAT en matière de sites et sols pollués, le traitement des sols et des nappes pollués peut avoir pour objectif d'éliminer une source de pollution évidente ou de réduire à un niveau acceptable les risques engendrés par la pollution.

Le maître d'ouvrage peut également être amené à traiter des déblais en surplus d'un chantier pour permettre leur réutilisation sur d'autres lieux ou leur stockage en centres de stockage de déchets inertes.

Le maître d'ouvrage peut enfin être amené à traiter des pollutions qui auraient un caractère agressif vis-à-vis des matériaux et équipements d'infrastructures (agression des bétons, des joints de parois moulées, des pompes de rabattement de nappe, etc.).

### Les grandes familles de traitement

Il existe de nombreuses techniques de dépollution des sols et des eaux que l'on peut classer :

- Selon la nature des traitements
  - Traitements physiques consistant à détruire (traitement thermique) extraire (pompage, excavation volatilisation) ou isoler (confinement, stabilisation) le polluant.
  - Traitements chimiques consistant à utiliser des réactifs chimiques pour détruire (oxydation, réduction), ou extraire (lavage) le polluant.
  - Traitements biologiques : consistant à utiliser les capacités métaboliques de microorganismes pour détruire (biotertre) ou modifier un polluant
- Selon le lieu où s'effectuent les traitements
  - In situ : traitement du sol ou de la nappe en place.

- Sur site : traitement sur le site après avoir extrait les milieux pollués : excavation puis traitement des sols sur le site ; pompage de nappe et traitement sur site.
- Hors site : les sols ou les eaux pollués sont extraits, transportés hors du site et traités sur une plateforme spécialisée.

Les solutions in situ sont, de manières générales moins coûteuses et plus longues que les solutions sur site et à fortiori hors site.

### Choisir une/des solutions de traitement

Le choix des solutions de traitement sur un site dépend :

- Des buts (Cf. 1er chapitre) et des performances attendues ;
- De la nature du sol ;
- Des types de polluants :
  - Organiques : hydrocarbures simples, hydrocarbures polycycliques (HAP), PCB, aromatiques (benzène toluène xylène, BTEX), solvants chlorés.
  - Minéraux : métaux, sels, etc.
  - Pollutions pyrotechniques ou radioactives (les solutions ne sont pas développées dans ce document).
- Du milieu impacté : sols, nappe, gaz du sol ;
- Du volume et de l'accessibilité des zones polluées ;
- De l'espace disponible sur site et de l'environnement du site ;
- Des délais ;

Le choix des solutions de traitement est donc complexe et spécifique à chaque site.

Il est en principe réalisé sur la base d'un bilan coûts-avantages prenant en compte des paramètres de faisabilité technique, économique et réglementaire, mais également selon les cas des paramètres

environnementaux, sociaux dans une logique de développement durable.

Le bilan coût avantages est imposé pour les sites relevant de la police des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) en application de la nouvelle méthodologie du MEEDDAT.

Cela impose la comparaison d'au moins deux techniques de traitement.

Très souvent, la solution retenue consiste en un mixte de plusieurs techniques pour répondre à la complexité des pollutions.

Les tableaux ci-après présentent les grandes familles de traitement et leurs caractéristiques techniques.

### Quelle fréquence d'utilisation des différentes techniques et quels coûts ?

A la fin de la présentation des différentes techniques, un document extrait du rapport ADEME « Taux d'utilisation et coût des différentes filières de traitement de sols et des eaux souterraines en France. Synthèse des données 2006 de janvier 2009 » présente les résultats de la dernière enquête auprès des professionnels.



#### Grandes familles de traitement et caractéristiques techniques

Nom	Type de traitement			Lieu de traitement			Domaine d'application	principe	Commentaires
	Physique	chimique	biologique	In situ	Sur site	Hors site			
<b>TRAITEMENT DES EAUX</b>									
<b>Pompage et traitement en surface</b>	X	X	(X)		X	(X)	Tous les polluants	Pompage des eaux de la nappe puis traitement en surface par charbon actif, stripping, biodégradation	La durée dépend de la mobilité des polluants et de la nappe dans les sols (peut-être très long).
<b>Sparging</b>		X	(X)	X			Polluants volatiles (hydrocarbures, BTEX, solvants chlorés...)	Extraction des polluants organiques volatils dissous dans la nappe par injection d'air ou d'oxygène. Les polluants sont volatilisés et capturés par les bulles d'air. La biodégradation est favorisée par l'oxygène. Cette technique est parfois couplée au Venting	
<b>Oxydation</b>		X		X	X		Composés organiques oxydables (solvants chlorés, PCB, aromatiques, matière organique)	Un oxydant chimique est introduit dans l'eau (in situ dans la nappe ou ex situ après pompage) et minéralise les polluants. Les oxydants classiques sont le peroxyde d'hydrogène, l'ozone, le Fenton, le permanganate de potassium, le persulfite de sodium.	Le réglage du traitement est pointu. La production et les effets potentiels des métabolites du traitement sont mal connus.
<b>Ecrémage</b>	X			X			Polluant flottant sur la nappe en phase pure : huile, pétrole, hydrocarbures légers...	Les polluants flottants sur la nappe sont attirés vers un puits par pompage dans la nappe. Un système d'écumage pneumatique ou par bande oléophile récupère la phase flottante accumulée. Le polluant est évacué vers un bac de récupération.	Ce système laisse toujours au moins quelques mm de produit flottant. Ce traitement peut être très long

Nom	Type de traitement			Lieu de traitement			Domaine d'application	Principes	Commentaires
	Physique	chimique	biologique	In situ	Sur site	Hors site			
<b>TRAITEMENT DES EAUX</b>									
<b>Extraction multi phases sous vide</b>	X			X			Polluants volatils dissous, gazeux et en phase pure	Des puits d'aspiration descendant dans le niveau de la nappe et sont reliés à une pompe à vide permettent la récupération des gaz du produit flottant et des eaux polluées. Les gaz et eaux son ensuite traités (charbon actif, oxydants...) tandis que la phase pure est évacuée vers un bac de récupération.	Dispositif couteux Opérationnel même si les sols sont peu perméables Dispositif complexe à installer et à piloter
<b>Barrières réactives</b>		X		X			Composés organiques oxydables (solvants chlorés...)	Une tranchée descendant sous le niveau de la nappe est remplie de matériaux perméables oxydants (fer). L'écoulement naturel de la nappe au travers du massif drainant provoque la minéralisation par oxydation des polluants.	Technique invisible en surface Ne nécessite pas d'énergie Risques de colmatage Traitement long
<b>Traitement biologique de nappe</b>			X	X			Hydrocarbures et solvants chlorés	La biodégradation des polluants est stimulée par l'injection ou la diffusion d'oxygène ou d'azote (bactéries aérobies) ou encore de sources de carbones telle que la mélasse, le lactate, les huiles (bactéries anaérobies)	Le réglage du traitement peut-être pointu. La production et les effets potentiels des métabolites du traitement sont mal connus
<b>Confinement hydraulique</b>	X			X			Tous polluants de la nappe	Un ou des pompages dans la nappe au moyen de puits ou de tranchées drainantes modifie localement l'écoulement des eaux pour éviter la migration des pollutions de la nappe et les fixer sur site	Système efficace mais permanent. Les eaux pompées peuvent/doivent être traitées avant rejet



Nom	Type de traitement			Lieu de traitement			Domaine d'application	Principes	Commentaires
	Physique	chimique	biologique	In situ	Sur site	Hors site			
<b>TRAITEMENT DES SOLS</b>									
<b>Venting</b>	X			X	X		Produits organiques volatils (hydrocarbures légers, BTEX,..)	Mise en dépression des sols par une pompe à vide afin d'aspirer les vapeurs polluées. L'air aspiré est traité par condensation, adsorption sur charbon actif, oxydation catalytique, etc. In situ, ce sont des puits ou aiguilles verticales enfoncées dans le sol qui permettent la mise en dépression. Sur site, le sol est rassemblé en terre isolé dans une « capsule » étanche et la mise en dépression est réalisée par des drains horizontaux.	Peu adaptés aux sols compacts et peu perméables
<b>Lavage des sols à l'eau</b>	X				X	X	Tous polluants	Après excavation, le sol est mélangé à l'eau pour extraire les fractions les plus fines et criblé mécaniquement. les fractions grossières sont propres et revalorisables.	Peu adapté aux sols argileux. Nécessite de la place
<b>Lavage des sols par solvant</b>	X					X	Produits organiques, PCB, pesticides, etc.	Les sols extraits sont lavés à contre courant par un solvant d'extraction qui est ensuite retraité	Couteux
<b>Bioventing</b>			X	X	X		Hydrocarbures les plus facilement biodégradables type essence	L'activité de bactérie dégradant les hydrocarbures est stimulée par injection d'air, et éventuellement de nutriments et tensio-actifs. La technique s'emploie in situ ou sur site à l'identique du venting.	Ce traitement est lent. Il est préférable de le réaliser sur site en terre avec des sols homogénéisés pour améliorer les performances. C'est souvent un traitement de finition pour éviter les émanations gazeuses. Peu adaptés aux sols compacts et peu perméables



Nom	Type de traitement			Lieu de traitement			Domaine d'application	Principes	Commentaires
	Physique	chimique	biologique	In situ	Sur site	Hors site			
<b>TRAITEMENT DES SOLS</b>									
<b>Landfarming biologique</b>			X		X	X	Produits organiques biodégradables hydrocarbures simples et certains HAP	Le sol à traiter est épandu en couche mince sur une aire de traitement, homogénéisé avec des agents structurants (sciure, écorces..). L'aération se fait par retournement mécanique régulier avec des engins agricoles	Technique lente et nécessitant beaucoup d'espace. Il n'y a pas de contrôle des lixiviats Risque d'odeurs
<b>Aération en andains</b>			X		X	X	Produits organiques biodégradables hydrocarbures simples et certains HAP	Le sol à traiter est homogénéisé avec des agents structurants (sciure, écorces..) et constitué en andains sur une aire de traitement. L'aération se fait par retournement mécanique régulier	Idem ci dessus
<b>Bioterre</b>			X		X	X	Produits organiques biodégradables : hydrocarbures, HAP, certains chlorés	Le sol, épandu en andains, est isolé dans une « capsule » étanche. L'aération du sol est réalisée par un surpresseur injectant l'air par un dispositif de drains.	Traitement lent nécessitant une bonne préparation et un réglage suivi. Peu adaptés aux sols compacts et peu perméables
<b>Désorption thermique</b>	X			X	X	X	Tous les produits organiques : hydrocarbures, pesticides, dioxine...	Les terres introduites dans un four sont chauffées à quelques centaines de degrés afin d'évaporer les polluants. les gaz extraits sont brûlés dans une chambre de postcombustion. Il existe des centres fixes et des installations mobiles.	Très haute performance. Même réglementation que l'incinération Difficulté lorsque les sols contiennent des métaux volatilisables (mercure par exemple).
<b>Procédé « Thermopile »</b>	X			X	X		Tous les produits organiques : hydrocarbures, pesticides, dioxine, etc.	La désorption thermique est réalisée soit in situ par injection d'air chaud au travers d'aiguilles verticales, soit sur site dans des tertres isolés, chauffés par des drains.	La technique en principe très performante est encore expérimentale.



Nom	Type de traitement			Lieu de traitement			Domaine d'application	Principes	Commentaires
	Physique	chimique	biologique	In situ	Sur site	Hors site			
<b>TRAITEMENT DES SOLS</b>									
<b>Cimenterie</b>	X					X	Métaux lourds et organiques	Les sols sont brûlés dans le four de cimenterie à haute température. la chaux du clinker stabilise les métaux	Très coûteux Très efficace en présence de pollutions multiples
<b>Incinération</b>	X					X	Organiques y compris fortement halogénés et lourds	L'incinération détruit les molécules dans un four à haute température	Très coûteux Très efficace pour les pollutions lourdes et très halogénées
<b>Inertage</b>	X	X			X		Tous les polluants	Les polluants sont fixés dans le sol par mélange avec une matrice fixant chimiquement et solidifiant le sol en blocs. Les terres inertes sont stockées	
<b>Phytoremédiation</b>			X	X	X		Tous les polluants	Des plantes détruisent les pollutions ou les stockent dans leur système racinaire. Les plantes stockant la pollution sont ensuite éliminées en centre de traitement.	Traitement très lent. Consommateur d'espace Peu coûteux Utilisable pour des pollutions faiblement concentrées généralement
<b>Atténuation naturelle</b>			X	X			Polluants bio dégradables	Il s'agit de laisser agir le pouvoir auto-épurateur du sol lorsque celui-ci a été constaté	Traitement très lent. Consommateur d'espace Peu coûteux
<b>Excavation et tri des terres</b>	X				X		Tous les polluants	Les sols sont extraits sélectivement et orientés vers des filières adaptées (sur site ou hors site) selon un plan de maillage prédéfini en fonction de campagnes d'échantillonnages et analyses préalables ou en fonction d'observations et mesures faites à l'avancement.	La présence de polluants volatils rend l'opération moins réalisable en raison de la dispersion des polluants à l'occasion des mouvements de terre.

Nom	Type de traitement			Lieu de traitement			Domaine d'application	Principes	Commentaires
	Physique	chimique	biologique	In situ	Sur site	Hors site			
<b>TRAITEMENT DES SOLS</b>									
<b>Confinement</b>	X			X	X		Tous les polluants	<p>Les sols pollués sont encapsulés dans des écrans étanches évitant la propagation des pollutions.</p> <p>In situ, des parois moulées isolent latéralement les sols tandis que les couvertures (terreuse non étanche, argileuse ou synthétique étanche) assurent l'isolement de la surface.</p> <p>Le fond peut éventuellement être partiellement isolé par des techniques de drains horizontaux.</p> <p>Sur site, les terres sont stockées sur des aires étanches et recouvertes de matériaux assurant une plus ou moins grande étanchéité selon le besoin puis éventuellement paysagées</p>	<p>Il ne s'agit pas d'une mode de traitement puisque la pollution subsiste mais d'un mode de gestion pour supprimer les transferts de pollution.</p> <p>Il y a à l'avenir un risque qu'il soit demandé de revenir traiter ces dépôts.</p> <p>In situ la technique des parois moulées est très lourde et couteuse.</p> <p>Sur site, la solution est consommatrice d'espace mais les stocks peuvent être intégrés au projet d'aménagement et paysagés.</p> <p>Il y a lieu de limiter l'usage des zones de stockage éventuellement par des servitudes.</p>
<b>Stockage des terres</b>	X					X	Tous les polluants	<p>Selon leurs qualités les terres sont stockées en centre de stockage de déchets :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- de classe 3 (terres remplissant les critères de l'arrêté de mars 2006)</li> <li>- de déchets non dangereux (ISDND)</li> <li>- de déchets dangereux (ISDD) (terres remplissant les conditions de l'arrêté du 30 décembre 2002)</li> </ul>	<p>Classe 3 : solution non sécurisée, peu couteuse</p> <p>ISDND et ISDD : solutions sécurisées et couteuses à très couteuses.</p> <p>Ces solutions sont en principe à réserver si aucune autre solution de traitement n'est possible, le stockage servant d'exutoire final aux déchets ultimes</p>

#### Analyse globale des taux d'utilisation et des coûts (HT) des différentes techniques et filières de traitement des soles pollués

##### 40% des tonnages traités par venting-bioventing et traitement biologique hors site.

Technique de traitement	Type	Tonnage 2006	Taux d'utilisation	Indicateur de fiabilité
Venting-Bioventing	In situ	454 600	20,6%	+
Installation de traitement biologique	Hors site	376 100	17,0%	+
Installation de Stockage de Déchets Inertes	Hors site	321 900	14,6%	-
Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux	Hors site	228 300	10,3%	-
Biodégradation (biotertre, etc)	Sur site	197 500	9,0%	+
Installation de désorption thermique	Hors site	116 300	5,3%	+
Oxydation chimique	In situ	76 300	3,5%	+
Désorption thermique	Sur site	63 600	2,9%	+
Confinement	Sur site	61 500	2,8%	+
Lavage de terres	Sur site	61 500	2,8%	-
Installation de Stockage de Déchets Dangereux	Hors site	59 600	2,7%	+
Stabilisation physico-chimique	Sur site	56 500	2,6%	-
Cimenterie	Hors site	53 300	2,4%	+
Confinement	In situ	35 500	1,6%	+
Installation de stabilisation physico-chimique	Hors site	20 200	0,9%	-
Installation d'incinération	Hors site	19 000	0,9%	+
Stabilisation physico-chimique	In situ	5 000	0,2%	-
Installation de lavage de terres	Hors site	2 000	0,1%	+
<b>Total</b>		<b>2 208 700 *</b>		

\* Les tonnages subissant plusieurs techniques ont été soustraits du tonnage global traité

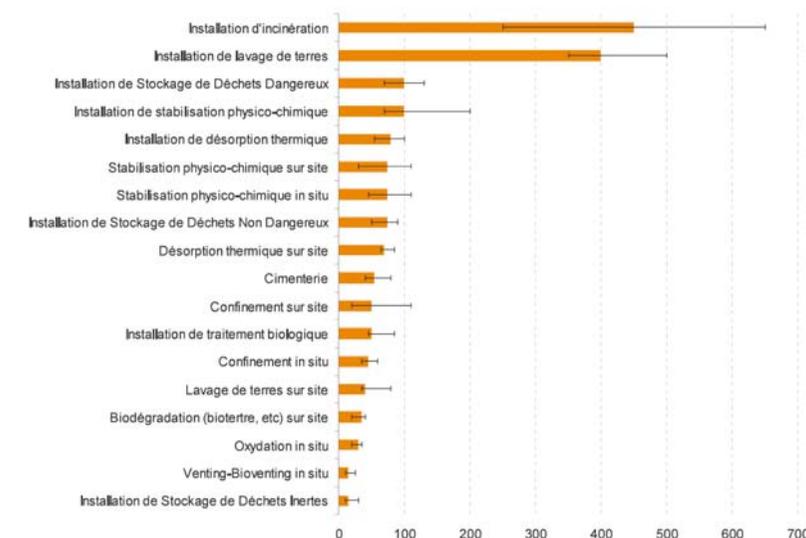


##### Une variabilité des coûts très importante d'un chantier à l'autre

Les coûts (HT) présentés ci-dessous n'incluent pas les coûts d'excavation et de transport.

Technique de traitement	Type	Variabilité des coûts (€/t)	Coûts moyens pondérés* (€/t)	Indicateur de fiabilité
Installation d'incinération	Hors site	250 - 650	450	+
Installation de lavage de terres	Hors site	350 - 500	400	+
Installation de stabilisation physico-chimique	Hors site	70 - 200	100	-
Installation de Stockage de Déchets Dangereux	Hors site	70 - 130	100	+
Installation de désorption thermique	Hors site	55 - 100	80	+
Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux	Hors site	50 - 90	75	-
Stabilisation physico-chimique	In situ	45 - 110	75	-
Stabilisation physico-chimique	Sur site	30 - 110	75	-
Désorption thermique	Sur site	65 - 85	70	+
Cimenterie	Hors site	40 - 80	55	+
Installation de traitement biologique	Hors site	45 - 85	50	+
Confinement	Sur site	20 - 110	50	+
Confinement	In situ	35 - 60	45	+
Lavage de terres	Sur site	35 - 80	40	-
Biodégradation (biotertre, etc)	Sur site	20 - 40	35	+
Oxydation chimique	In situ	20 - 35	30	+
Installation de Stockage de Déchets Inertes	Hors site	10 - 30	15	+
Venting-Bioventing	In situ	10 - 25	15	+

\* Les coûts moyens collectés auprès des acteurs ont été pondérés par les tonnages correspondants



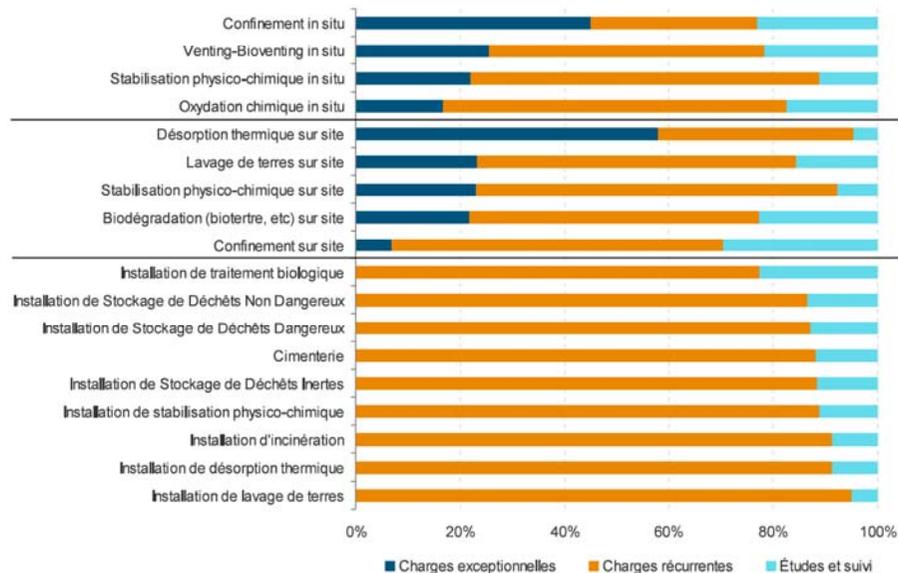
Type de coûts	Moyenne 2006	Minimum	Maximum
Excavation (€/t)	10	5	25
Transport (€/tkm)	0,3	0,15	1

#### Une répartition des coûts hétérogène entre les filières hors site et des techniques in situ / sur site

Les coûts d'utilisation des techniques et filières peuvent se répartir en 3 types de charges :

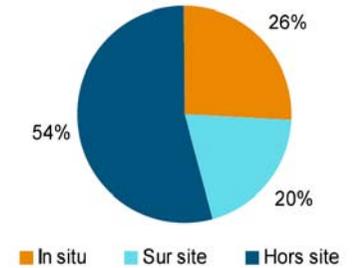
- Charges exceptionnelles (investissement), intervenant de façon unique (au démarrage du chantier par exemple),
- Charges récurrentes à renouveler au cours du traitement (maintenance, mise en œuvre),
- Charges liées aux études et suivi de la dépollution.

Ces charges sont indiquées pour l'ensemble du chantier, depuis la rédaction du cahier des charges jusqu'au rendu du rapport de fin de chantier.



#### La domination du marché par les filières hors site

Type	Tonnages 2006
In situ	571 400
Sur site	440 600
Hors site	1 197 100

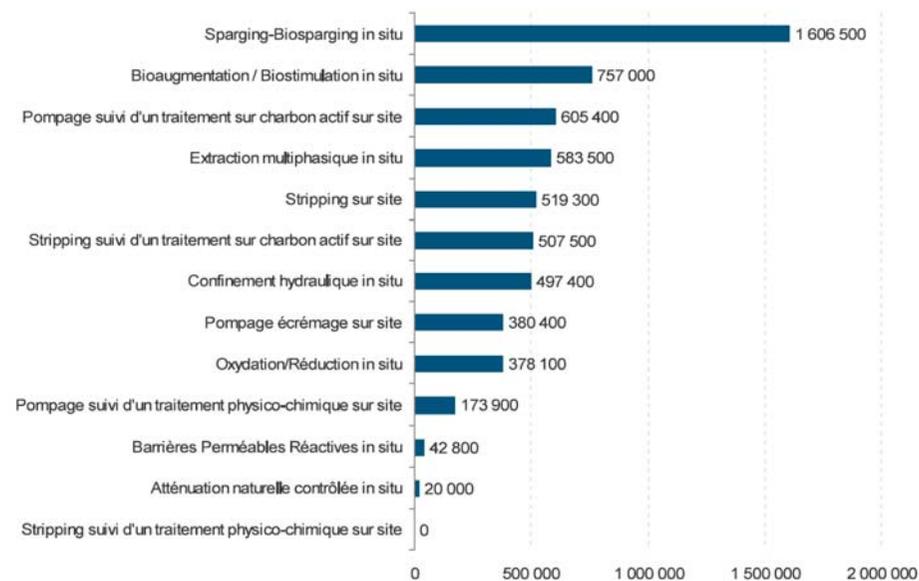


## Analyse globale des taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des eaux souterraines polluées

Plus de 25% des volumes traités par Sparginig-Biosparing in situ

Technique de traitement	Type	Volumes 2006 (m3)	Taux d'utilisation	Indicateur de fiabilité
Sparging-Biosparing	In situ	1 606 500	26,5%	+
Bioaugmentation / Biostimulation	In situ	757 000	12,5%	+
Pompage suivi d'un traitement sur charbon actif	Sur site	605 400	10,0%	+
Extraction multiphasique	In situ	583 500	9,6%	+
Stripping	Sur site	519 300	8,6%	+
Stripping suivi d'un traitement sur charbon actif	Sur site	507 500	8,4%	+
Confinement hydraulique	In situ	497 400	8,2%	-
Pompage écrémage	Sur site	380 400	6,3%	+
Oxydation/Réduction	In situ	378 100	6,2%	+
Pompage suivi d'un traitement physico-chimique	Sur site	173 900	2,9%	+
Barrières Perméables Réactives	In situ	42 800	0,7%	-
Atténuation naturelle contrôlée	In situ	20 000	0,3%	-
<b>Total</b>		<b>5 886 800</b>		

Le stripping suivi d'un traitement physico-chimique sur site a été supprimé car aucun volume n'a été traité en 2006



Une variabilité des coûts importante d'un chantier à l'autre

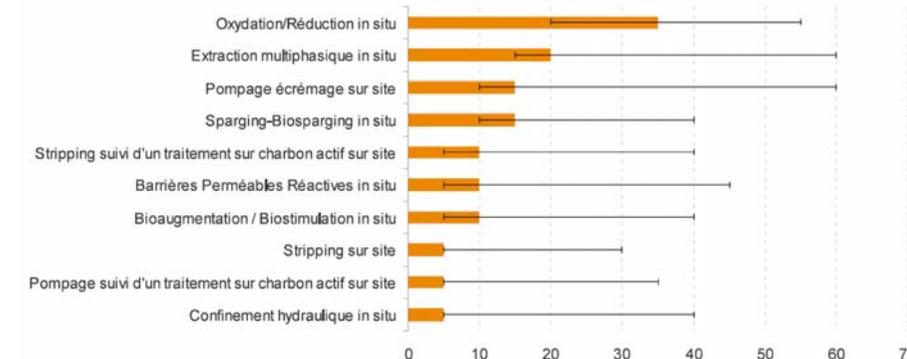
Le coût de pompage est inclus dans les coûts (HT) présentés ci-après.

Technique de traitement	Type	Variabilité des coûts (€/m3)	Coûts moyens pondérés * (€/m3)	Indicateur de fiabilité
Oxydation/Réduction	In situ	20 - 55	35	+
Extraction multiphasique	In situ	15 - 60	20	+
Sparging-Biosparing	In situ	10 - 40	15	+
Pompage écrémage	Sur site	10 - 60	15	+
Bioaugmentation / Biostimulation	In situ	5 - 40	10	+
Barrières Perméables Réactives	In situ	5 - 45	10	-
Stripping suivi d'un traitement sur charbon actif	Sur site	5 - 40	10	+
Confinement hydraulique	In situ	5 - 40	5	-
Pompage suivi d'un traitement sur charbon actif	Sur site	5 - 35	5	+
Stripping	Sur site	5 - 30	5	+

\* Les coûts moyens collectés auprès des acteurs ont été pondérés par les volumes correspondants

Remarque:

Les coûts moyens pondérés de l'atténuation naturelle ont été écartés par manque d'exhaustivité des données collectées. Quant au pompage suivi d'un traitement physico-chimique, aucun volume n'a été traité en 2006.



Type de coûts	Moyenne 2006	Minimum	Maximum
Pompage (€/m3)	1	1	3

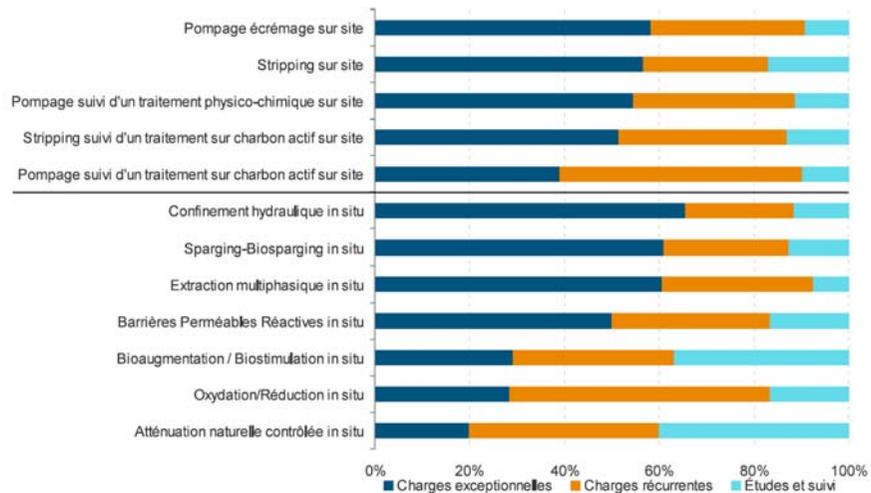


#### Une répartition des coûts hétérogène

Les coûts d'utilisation des techniques peuvent se répartir en 3 types de charges :

- Charges exceptionnelles (investissement), intervenant de façon unique (au démarrage du chantier par exemple),
- Charges récurrentes à renouveler au cours du traitement (maintenance, mise en œuvre),
- Charges liées aux études et suivi de la dépollution.

Ces charges sont indiquées pour l'ensemble du chantier, depuis la rédaction du cahier des charges jusqu'au rendu du rapport de fin de chantier.



#### La domination du marché par les technique in situ

Type	Volumes 2006
In situ	3 885 300
Sur site	2 186 500

