

Document Ressource SelecDEPOL

Ce document présente les sources d'informations de l'outil SelecDEPOL.

Il présente également les hypothèses retenues pour certains paramètres de présélection des techniques de dépollution : perméabilité, coûts, délais, efficacité, maturité et taux d'utilisation. Il peut être utilisé pour une comparaison facilitée des techniques de dépollution selon ces mêmes critères.

1. Sources d'informations

L'ensemble des informations disponibles dans SelecDEPOL pour les **Techniques de Dépollution** et les **Techniques de Maîtrise des Voies de Transferts de la pollution (Mesures Constructives)** est issu de différents guides et études :

- [1] [Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-bénéfices \(2010\) - S. Colombano, A. Saada, V. Guerin, P. Bataillard, G. Bellenfant, S. Beranger, D. Hube, C. Blanc, C. Zornig et I. Girardeau, Rapport final BRGM/RP-58609-FR](#)
- [2] [Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des sols et eaux souterraines pollués en France – Synthèse des données 2012 - Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par Ernst & Young – 2015](#)
- [3] Coûts fournis par l'Union des Professionnels de la Dépollution des Sols (UPDS) (2019) – document confidentiel
- [4] [Projet ESTRAPOL « Essais de faisabilité de traitement des sites et sols pollués »](#)
- [5] [Guide relatif aux mesures constructives utilisables dans le domaine des SSP - BRGM/RP-63675-FR – v. Août 2014](#)

Source d'information	Fiches techniques de dépollution							Fiches Mesures constructives
	Coût	Maturité	Efficacité	Délais	Taux d'utilisation	Faisabilité et dimensionnement	Perméabilité	
Quelles techniques pour quels traitements [1]	x		x	x			x	
Synthèse des données 2012 [2]	x				x			
Coûts UPDS 2019 [3]	x							
Projet ESTRAPOL [4]						x	x	
Guide mesures constructives [5]								x

2. Hypothèses et comparaison des techniques de dépollution

2.1. Comparaison par coûts

Paramètres d'influence

Les coûts de mise en œuvre d'une technique de dépollution ou d'une filière de traitement sont essentiellement sous l'influence des paramètres suivants :

- les caractéristiques géologiques du site,
- la concentration initiale en polluant et les objectifs de réhabilitation,
- la taille du chantier (surface et profondeur),
- les délais de dépollution impartis,
- la maîtrise de la technique ou de la filière.

Critères d'interprétation

Le rapport ADEME « Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des sols et eaux souterraines pollués en France » [2] présente des coûts pour l'année 2012. Les coûts sont considérés hors taxes et hors TGAP. Les coûts d'excavation et de transport ne sont pas inclus pour les techniques hors site. Dans cette étude, les coûts du venting et du bioventing sont confondus, les coûts de l'oxydation chimique *in situ* et de la réduction chimiques *in situ* sont confondus et les coûts du sparging et du biosparging sont confondus.

Enfin, les coûts fournis par l'Union des Professionnels de la Dépollution des Sols sont ceux acquis en 2019.

Ce sont ces chiffres de 2019, les plus récents, qui sont présentés dans les graphiques suivants.

Le rapport BRGM « Quelle technique pour quel traitement ? » [1], plus ancien, reste une référence utile pour l'interprétation des coûts. Il présente ces coûts pour l'année 2009, entre une valeur basse et une valeur haute. Lorsque cela est judicieux, il tient compte du lieu de mise en œuvre (*in situ*, sur site et hors site).

La taille des chantiers joue un rôle prépondérant sur le choix du type de dépollution : plus les chantiers sont importants, plus le traitement sur site pourra être préféré, alors que plus les chantiers sont petits, plus le traitement Hors site sera compétitif. Ceci est en partie dû aux effets d'économie d'échelle pouvant avoir lieu sur les grands chantiers : les traitements sur site nécessitent des équipements spécifiques et deviennent plus compétitifs à partir d'un certain volume à traiter. Par ailleurs, l'espace disponible pour la mise en œuvre de ces techniques est aussi un paramètre de décision important.

Les valeurs basses des fourchettes de prix reposent sur l'hypothèse d'un site à accessibilité aisée, de taille importante, avec des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques (en termes de perméabilité, de teneurs en matière organique, de porosité, ...) ainsi que des caractéristiques intrinsèques à la pollution très favorables au bon fonctionnement de la technique (caractéristiques physico-chimiques, concentrations initiales, concentrations finales, volumes...).

Les valeurs hautes des fourchettes de prix reposent sur l'hypothèse de sites à accessibilité faible, de faible taille, avec des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques, ainsi que des caractéristiques intrinsèques à la pollution peu favorables au bon fonctionnement de la technique.

Les prix des traitements *in situ* prennent en compte l'amenée/repli des installations, la réalisation des forages, l'installation des unités de traitement, le traitement des rejets (sauf lorsque cela est mentionné), le suivi et la maintenance de la dépollution. *La consommation électrique n'est cependant pas prise en compte.*

Les prix des traitements sur site prennent en compte l'amenée/repli des installations, l'installation des unités de traitement, le traitement des rejets, le suivi et la maintenance de la dépollution. En revanche, *les prix ne prennent pas en compte l'excavation et le tri des terres (avant traitement), le transport interne et la consommation électrique.*

Les prix des traitements hors situ ne prennent en compte ni l'excavation et le tri des terres, ni le transport, ni une éventuelle TGAP.

Pour certaines techniques (par exemple : le confinement ou la barrière perméable réactive), le facteur influençant principalement le coût est la surface concernée et non le volume d'eau traité ou la masse de terre traitée. Par conséquent, les coûts sont indiqués en €/m².

Ces chiffres de 2009, relativement anciens, ne sont pas présentés dans les graphiques suivants.

Coûts admis pour le traitement des sols

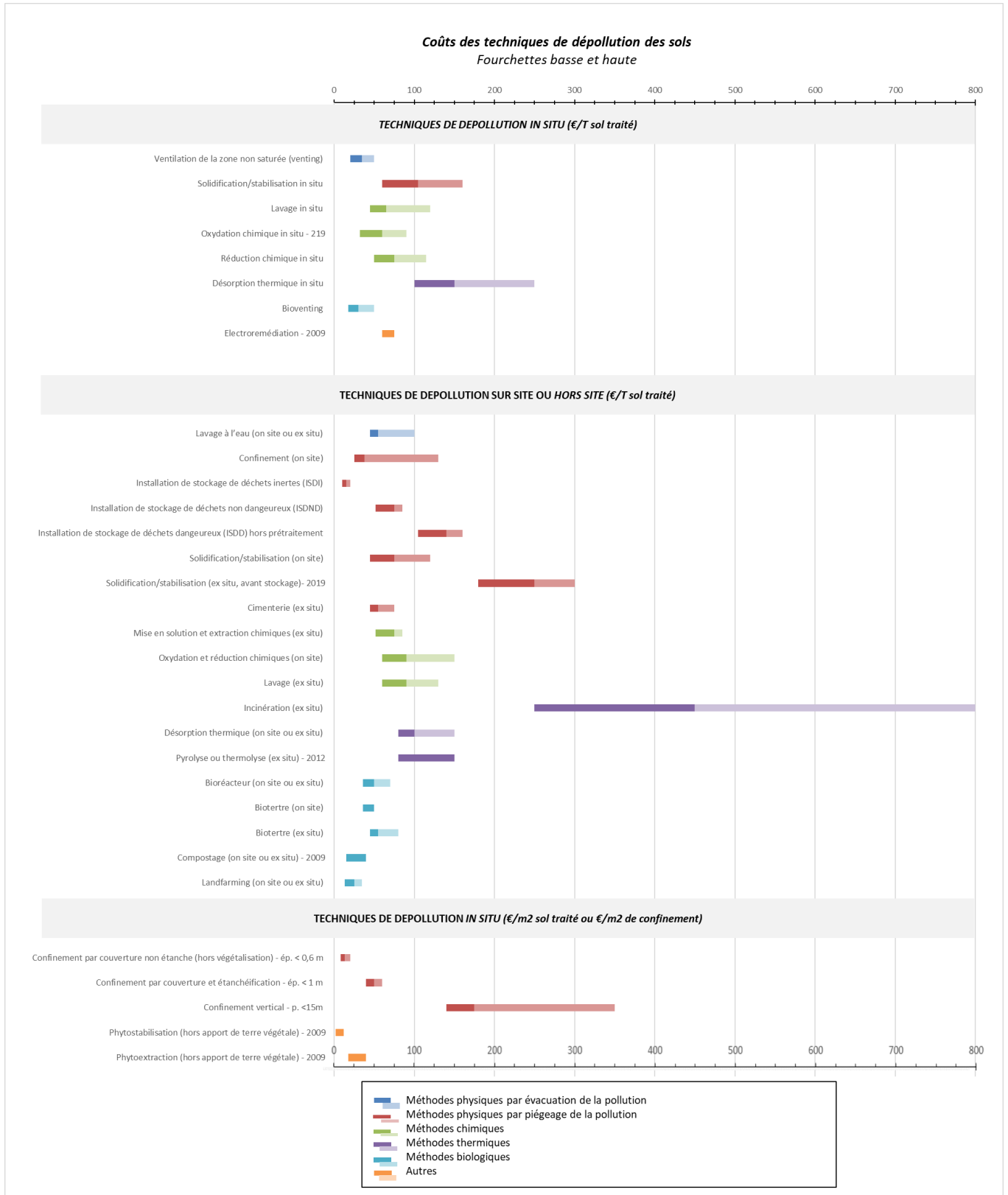


Figure 1. Coûts (valeurs basses et hautes) pour différentes techniques en €/T de sol traité et en €/m² de sol traité ou de confinement créé.

Coûts admis pour le traitement des eaux

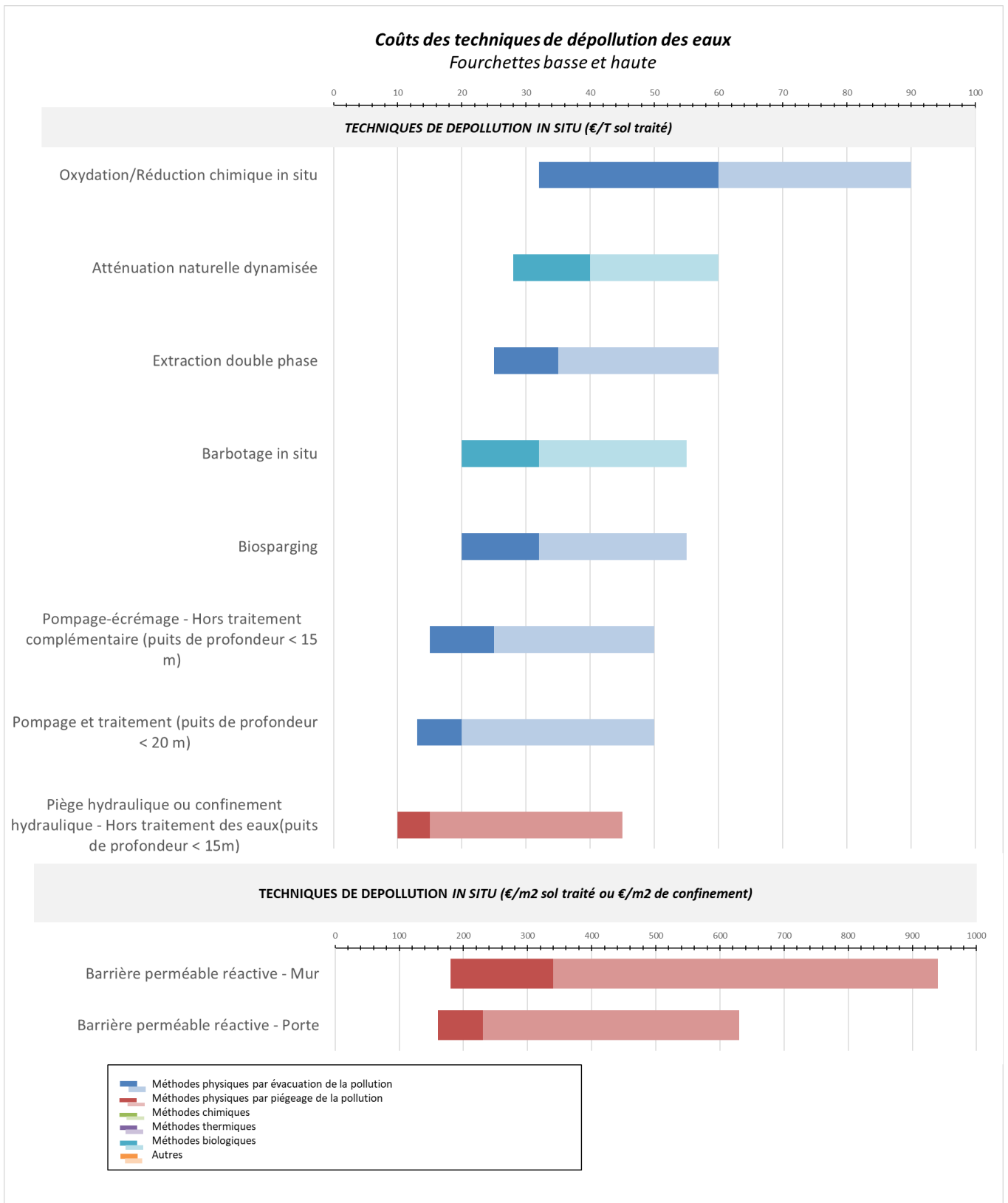


Figure 2. Coûts (valeurs basses et hautes) pour différentes techniques en euros/m³ de liquide pompés/traités ou d'eaux traitées en place, ou en euros/m² de surface (d'eaux traitée ou de barrière construite).

2.2. Comparaison des techniques par délais

Paramètres d'influence

La durée de traitement est sous l'influence de plusieurs paramètres :

- les caractéristiques géologiques du site,
- la concentration initiale en polluant et les objectifs de réhabilitation,
- la quantité de terre polluée (surface et profondeur),
- les usages futurs du site.

Les durées de traitement présentées dans le graphique ci-dessous reposent sur plusieurs hypothèses :

- site à accessibilité aisée, de taille importante, avec des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques très favorables au bon fonctionnement de la technique (en termes de perméabilité, de teneurs en matière organique, de porosité, ...),
- des caractéristiques intrinsèques à la pollution très favorables au bon fonctionnement de la technique (caractéristiques physico-chimiques, concentrations initiales, concentrations finales, volumes...).

Ces durées ne prennent pas en compte les délais d'excavation et les suivis post traitement.

Délais admis pour les traitements

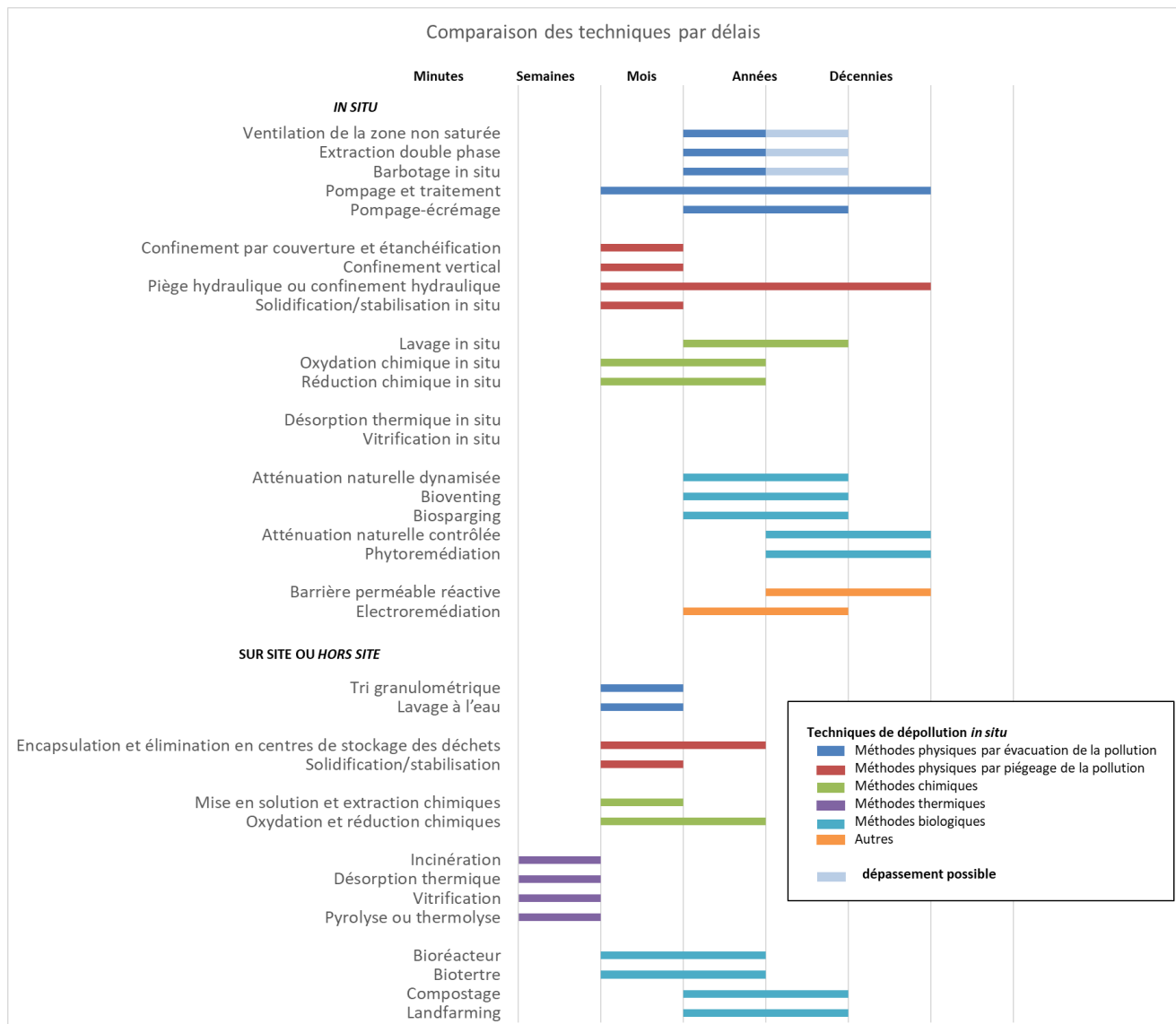


Figure 3. Comparaison des délais pour différentes techniques (BRGM, 2010).

2.3. Comparaison des techniques par efficacité

Références utilisées dans SelecDEPOL

Il existe peu de documents en France qui donnent des ordres de grandeur d'efficacité les techniques de dépollution. L'outil SelecDEPOL s'est basé sur le rapport BRGM : [Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-bénéfices \(2010\) - S. Colombano, A. Saada, V. Guerin, P. Bataillard, G. Bellenfant, S. Beranger, D. Hube, C. Blanc, C. Zornig et I. Girardeau, Rapport final BRGM/RP-58609-FR](#)

Critères d'interprétation

L'efficacité correspond ici :

- aux rendements épuratoires moyens atteignables par la technique pour les filières de traitement,
- ou
- à l'efficacité de capture du polluant pour les filières de gestion.

Les pourcentages annoncés dans le tableau ci-dessous reposent sur plusieurs hypothèses :

- site à accessibilité aisée, de taille importante, avec des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques très favorables au bon fonctionnement de la technique (en termes de perméabilité, de teneurs en matière organique, de porosité.....)
- caractéristiques intrinsèques à la pollution très favorables au bon fonctionnement de la technique (caractéristiques physico-chimiques, concentrations initiales, concentrations finales, volumes...).

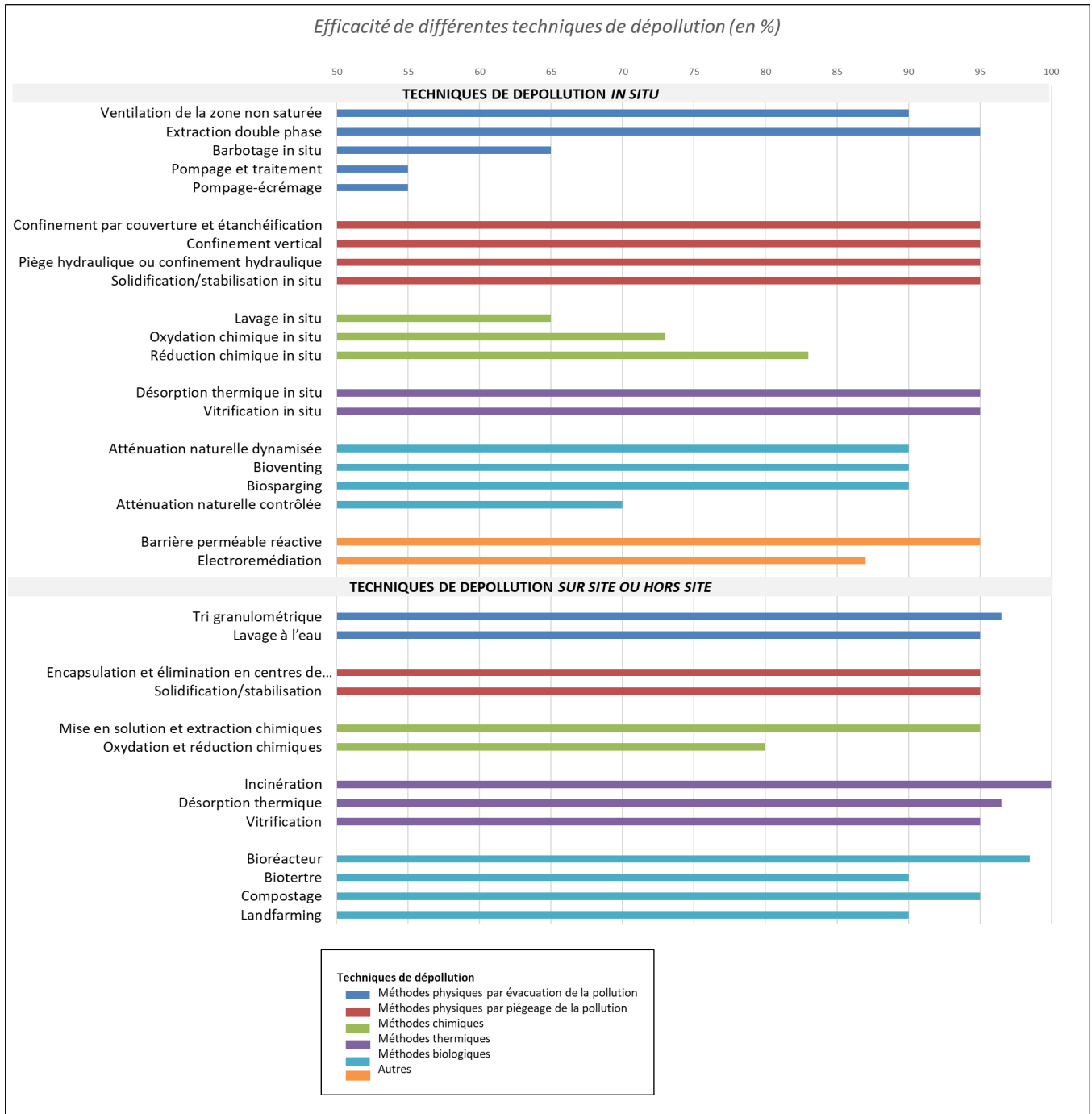


Figure 4. Comparaison de l'efficacité de différentes techniques (BRGM, 2010).

2.4. Comparaison des techniques par maturité

Définition

La notion de technique mature correspond aux procédés éprouvés et approuvés en France et à l'étranger.

La maturité est indépendante du taux d'utilisation.

Sur le site SelecDEPOL, la liste des techniques de dépollution peut être triée par ordre décroissant de maturité.

Maturité admise pour les traitements

Type de technique	Technique	Maturité
Techniques de dépollution <i>in situ</i>		
Méthodes physiques par évacuation de la pollution	Ventilation de la zone non saturée	Mature
	Extraction double phase	Mature
	Barbotage <i>in situ</i>	Mature
	Pompage et traitement	Mature
	Pompage-écrémage	Mature
Méthodes physiques par piégeage de la pollution	Confinement par couverture et étanchéification	Mature
	Confinement vertical	Mature
	Piège hydraulique ou confinement hydraulique	Mature
	Solidification/stabilisation <i>in situ</i>	Peu mature
Méthodes chimiques	Lavage <i>in situ</i>	Peu mature
	Oxydation chimique <i>in situ</i>	Mature
	Réduction chimique <i>in situ</i>	Peu mature
Méthodes thermiques	Désorption thermique <i>in situ</i>	Peu mature
	Vitrification <i>in situ</i>	Recherche et Développement
Méthodes biologiques	Atténuation naturelle dynamisée	Mature
	Bioventing	Mature
	Biosparging	Mature
	Atténuation naturelle contrôlée	Mature
	Phytoremédiation	Peu mature
Autres	Barrière perméable réactive	Mature
	Electroremédiation	Recherche et Développement
Techniques de dépollution on site ou <i>ex situ</i>		
Méthodes physiques par évacuation de la pollution	Excavation des sols	Mature
	Tri granulométrique	Mature
	Lavage à l'eau	Mature
Méthodes physiques par piégeage de la pollution	Encapsulation et élimination en centres de stockage des déchets	Mature
	Solidification/stabilisation	Mature
Méthodes chimiques	Mise en solution et extraction chimiques	Peu mature
	Oxydation et réduction chimiques	Peu mature
Méthodes thermiques	Incinération	Mature
	Désorption thermique	Mature
	Vitrification	Peu mature
	Pyrolyse ou thermolyse	Peu mature
Méthodes biologiques	Bioréacteur	Peu mature
	Biotertre	Mature
	Compostage	Mature
	Landfarming	Mature

Tableau 1. Comparaison de la maturité de différentes techniques (BRGM, 2010).

2.5. Comparaison des techniques en fonction de la perméabilité des sols

De nombreux paramètres influencent la faisabilité des techniques de dépollution. Parmi ces critères, la perméabilité des sols joue un rôle important plus particulièrement pour les techniques basées sur l'injection et la circulation de fluides dans les milieux à dépolluer.

D'autres paramètres peuvent également influencer la faisabilité de certaines techniques de dépollutions : le comportement des polluants, l'hétérogénéité et la stratification des sols, la présence de phase pure polluante mobile dans les milieux, la géochimie des sols et des eaux souterraines ou encore la profondeur et la vitesse d'écoulement des eaux souterraines ...

Les informations ci-dessous sont tirées du guide BRGM datant de 2010, "Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-bénéfices" [1].

Sur le site SelecDEPOL, la liste des techniques de dépollution peut être affinée en sélectionnant une gamme de perméabilités.

Type de technique	Technique	$k \text{ (m/s)} < 10^{-5}$	$10^{-5} < k \text{ (m/s)} < 10^{-3}$	$k \text{ (m/s)} > 10^{-3}$
Techniques de dépollution <i>in situ</i>				
Méthodes physiques par évacuation de la pollution	Ventilation de la zone non saturée	Inadaptée	Adaptée	Très adaptée
	Extraction double phase	Adaptée	Adaptée	Très adaptée
	Barbotage <i>in situ</i>	Inadaptée	Adaptée	Très adaptée
	Pompage et traitement	Inadaptée	Adaptée	Très adaptée
	Pompage-écrémage	Inadaptée	Adaptée	Très adaptée
Méthodes physiques par piégeage de la pollution	Confinement par couverture et étanchéification	Très adaptée	Très adaptée	Très adaptée
	Confinement vertical	Très adaptée	Très adaptée	Très adaptée
	Piège hydraulique ou confinement hydraulique	Inadaptée	Adaptée	Très adaptée
	Solidification/stabilisation <i>in situ</i>	Adaptée	Adaptée	Très adaptée
Méthodes chimiques	Lavage <i>in situ</i>	Inadaptée	Adaptée	Très adaptée
	Oxydation chimique <i>in situ</i>	Inadaptée	Adaptée	Très adaptée
	Réduction chimique <i>in situ</i>	Inadaptée	Adaptée	Très adaptée
Méthodes thermiques	Désorption thermique <i>in situ</i>	Adaptée	Adaptée	Très adaptée
	Vitrification <i>in situ</i>	Très adaptée	Adaptée	Inadaptée
Méthodes biologiques	Biodégradation dynamisée	Inadaptée	Adaptée	Très adaptée
	Bioventing	Inadaptée	Adaptée	Très adaptée
	Biosparging	Inadaptée	Adaptée	Très adaptée
	Atténuation naturelle contrôlée	Inadaptée	Adaptée	Très adaptée
	Phytoremédiation	Adaptée	Adaptée	Très adaptée
Autres	Barrière perméable réactive	Très adaptée	Très adaptée	Très adaptée
	Electroremédiation	Très adaptée	Adaptée	Inadaptée
Techniques de dépollution on site ou <i>ex situ</i>				
Méthodes physiques par évacuation de la pollution	Excavation des sols	Très adaptée	Très adaptée	Très adaptée
	Tri granulométrique	Adaptée	Très adaptée	Très adaptée
	Lavage à l'eau	Adaptée	Très adaptée	Très adaptée
Méthodes physiques par piégeage de la pollution	Encapsulation et élimination en centres de stockage des déchets	Très adaptée	Très adaptée	Très adaptée
	Solidification/stabilisation	Très adaptée	Très adaptée	Très adaptée
Méthodes chimiques	Mise en solution et extraction chimiques	Adaptée	Très adaptée	Très adaptée
	Oxydation et réduction chimiques	Adaptée	Très adaptée	Très adaptée
Méthodes thermiques	Incinération	Très adaptée	Très adaptée	Très adaptée
	Désorption thermique	Adaptée	Très adaptée	Très adaptée
	Vitrification	Très adaptée	Très adaptée	Très adaptée
	Pyrolyse ou thermolyse	Très adaptée	Très adaptée	Très adaptée
Méthodes biologiques	Bioréacteur	Adaptée	Très adaptée	Très adaptée
	Bioterre	Adaptée	Très adaptée	Très adaptée
	Compostage	Adaptée	Très adaptée	Très adaptée
	Landfarming	Adaptée	Très adaptée	Très adaptée

Tableau 2. Comparaison des techniques applicables *in situ* en fonction de la perméabilité des sols (BRGM, 2010).

2.6. Comparaison des techniques par taux d'utilisation

Les taux d'utilisation des techniques de dépollutions et de gestion des sites et sols pollués les plus récents ont été obtenus au cours d'une enquête ADEME conduite en 2012 auprès des acteurs professionnels du domaine des sites et sols pollués [2]. Ils ont été obtenus pour le sol et l'eau souterraine, sur la base du chiffre d'affaires « travaux » des entreprises de dépollution. Pour le sol, ils sont aussi extrapolés du taux de couverture sur les tonnages de terres :

- déclarés par les centres de traitement hors site,
- déclarés par les installations de stockage de déchets dangereux (ISDD),
- envoyés en cimenterie (les détails de la méthode sont décrits dans les rapports ADEME).

En 2012, les techniques suivantes n'ont pas été mises en oeuvre par les acteurs ayant répondu à l'enquête :

- pour les sols :
 - la phytostabilisation,
 - la phytoremédiation *in situ*,
 - le lavage des terres *in situ*,
- pour les eaux souterraines :
 - le lavage *in situ*,
 - la désorption thermique,
 - l'électroremédiation.

Sur le site **SelecDEPOL** la liste des techniques de dépollution peut être triée par ordre décroissant des taux d'utilisation pour le sol ou pour l'eau souterraine. La visualisation des résultats est facilitée par l'association de gammes de taux aux libellés du tableau 3 ci-dessous.

Libellés	Gammes de valeur du taux moyen d'utilisation
Très élevé	> 20 %
Elevé	15 % - 20 %
Significatif	10 % - 15 %
Modéré	5 % - 10 %
Faible	0% - 5 %

Tableau 3. Correspondance entre libellés et gammes de valeurs du taux moyen d'utilisation. Légende des couleurs associées.

Dans les graphiques des figures 5 et 6 ci-dessous les taux d'utilisation des techniques de dépollution et de gestion sont détaillés pour le sol et l'eau souterraine en fonction des différents types de méthodes appliquées.

Pour les sols

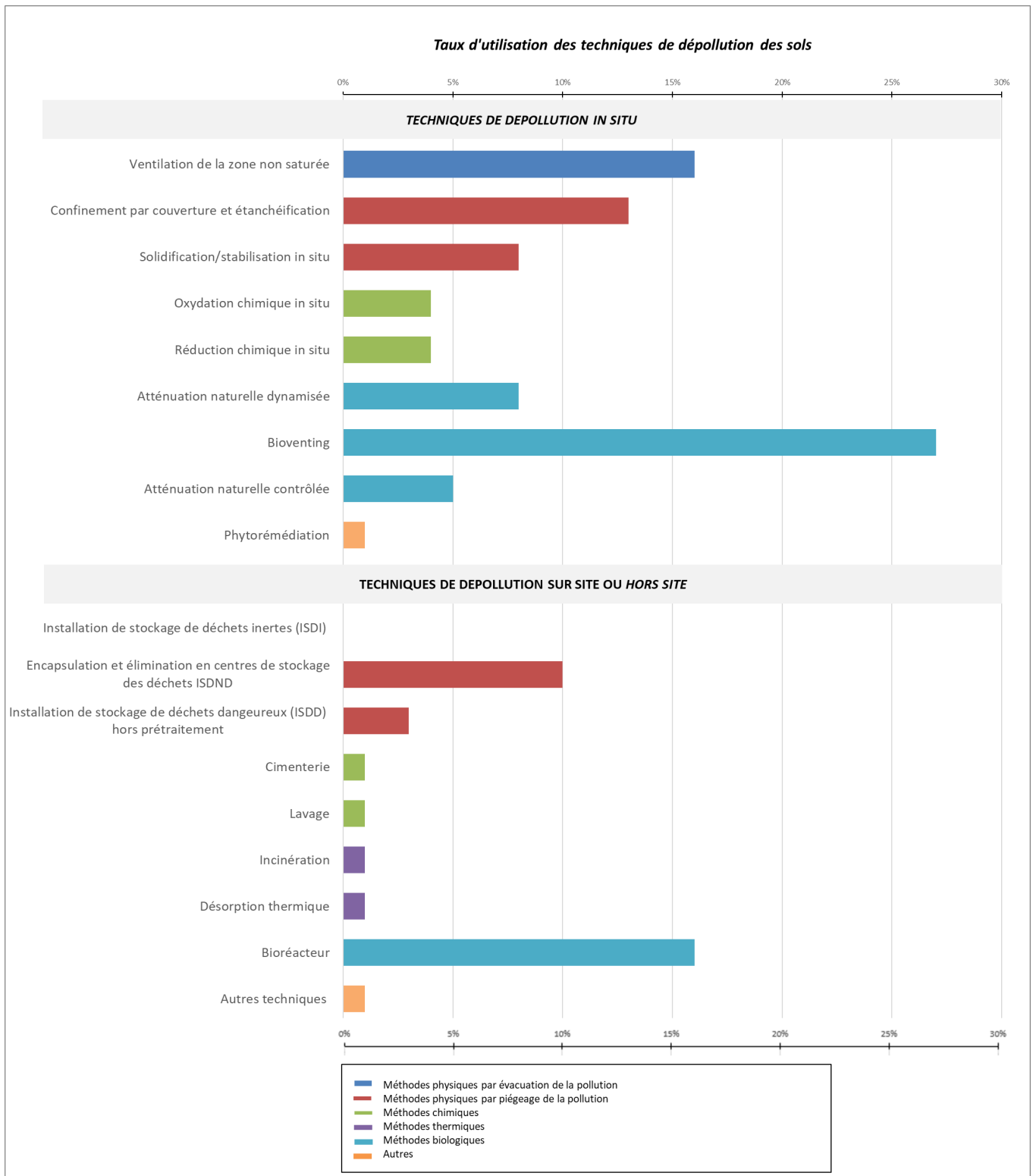


Figure 5. Comparaison des taux d'utilisation pour différentes techniques de traitement des sols en % en 2012 (ADEME, 2015).

Pour les eaux souterraines

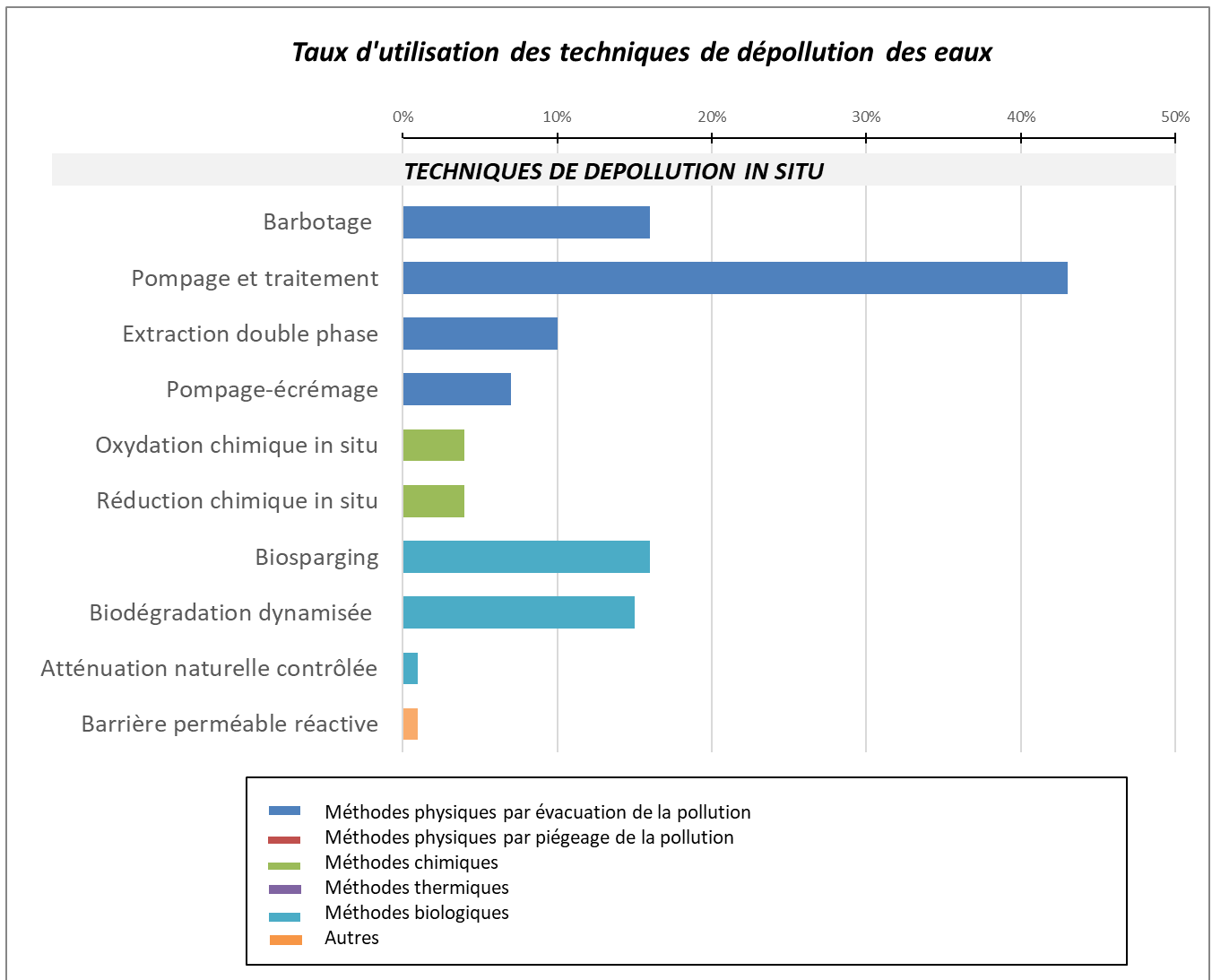


Figure 6. Comparaison des taux d'utilisation pour différentes techniques de traitement des eaux souterraines en % en 2012 (ADEME, 2015).

Les tableaux 4 à 5 ci-dessous sont fournis en complément des informations disponibles sur SelecDEPOL. Ils se basent sur la moyenne des taux d'utilisation obtenus par les enquêtes ADEME en 2008, 2010 et 2012[2], hors ISDI (Installation de stockage de déchets inertes). Cette moyenne est proposée pour lisser la prépondérance de certaines techniques induite par quelques chantiers ponctuels qui génèrent le traitement de forts tonnages de terre ou de forts cubages d'eau souterraine. Dans ces tableaux les taux d'utilisation des techniques suivantes ont été confondus :

- venting et du bioventing,
- oxydation chimique *in situ* et réduction chimiques *in situ*,
- sparging et biosparging.

La légende des couleurs est fournie par le tableau 3.

Technique de dépollution / gestion	Taux d'utilisation moyen
Techniques <i>in situ</i>	
Venting, bioventing	27,0 %
Confinement	12,5 %
Bioaugmentation, biostimulation	4,6 %
Oxydation, réduction chimiques	3,1 %
Autres traitements <i>in situ</i>	1,5 %
Traitement thermique	1,3 %
Stabilisation physico-chimique	0,8 %
Phytoremédiation	0,1 %
Techniques on site	
Biodégradation	7,5 %
Stabilisation physico-chimique	7,4 %
Confinement	1,8 %
Lavage de terres	0,2 %
Autres traitements sur site	0,2 %
Traitement thermique	0,1 %
Techniques <i>ex situ</i>	
Traitement biologique	15,5 %
Installation de stockage de déchets non dangereux	9,5 %
Installation de stockage de déchets dangereux	2,2 %
Traitement thermique	2,0 %
Cimenterie	0,8 %
Envoi à l'étranger	0,6 %
Installation de stabilisation	0,6 %
Installation d'incinération	0,4 %
Autres techniques hors site	0,2 %
Installation de lavage terres	0,2 %

Tableau 4. Liste des techniques de dépollution et de gestion des sols par ordre décroissant de taux moyen d'utilisation.

Technique de dépollution / gestion	Taux d'utilisation moyen
Pompage et traitement	42,4 %
Sparging, biosparging <i>in situ</i>	15,4 %
Bioaugmentation, biostimulation <i>in situ</i>	14,9 %
Extraction multiphasique	9,5 %
Confinement hydraulique	7,7 %
Pompage écrémage	6,2 %
Oxydation, réduction <i>in situ</i>	3,6 %
Barrière perméable réactive	0,3 %
Atténuation naturelle contrôlée <i>in situ</i>	0,1 %

Tableau 5. Liste des techniques de dépollution des eaux souterraines par ordre décroissant de taux moyen d'utilisation.