	ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS	Page : 24/74
	PLAN DE GESTION	Date : 24/05/2019
	Des parcelles AM 40 et AM 100	N° 16B76-PLMM

Selon toute vraisemblance, le colmatage des berges du Petit-Bassin est lié à la présence de ces limons. Les mêmes causes provoquant les mêmes effets, ces limons bloquent les transferts des eaux alluviales vers la Seine, comme cela a été mis en évidence en limite du boulevard maritime le long de la limite ouest de l'ancienne raffinerie.

De plus, les palplanches présentes en bordure de Seine, implantées avec les équipements portuaires, constituent un écran d'isolation supplémentaire.

Ces deux schémas « construits » à partir des données de terrain, valident les hypothèses qui avaient été retenues dans la modélisation réalisée par la société ANTEA, et permettent d'affirmer que :

- La majeure partie de la matrice dans laquelle circule la nappe des alluvions modernes est sablonneuse ;
- Les berges de la Seine sont « colmatées » par des alluvions de type limons dont la perméabilité est assez faible (de l'ordre de 1.10^{-6} m/s), bloquant les transferts latéraux des hydrocarbures depuis la nappe alluviale, vers la Seine ;
- les échanges verticaux dans la nappe alluviale se font principalement entre la craie et le plancher des alluvions, peu ou pas concernés par la présence des hydrocarbures.


5. CONCLUSION SUR LES CIBLES « SEINE ET RESERVOIR DE LA CRAIE »

Une modélisation du comportement des eaux circulant dans le sandwich alluvionnaire a été réalisée en 2013.

Les conclusions de cette étude tendaient à montrer que les échanges entre la Seine et les eaux souterraines impliquaient majoritairement les eaux circulant en profondeur, d'une part, et que les échanges verticaux entre les eaux en tête du réservoir, impactées par les hydrocarbures, et les eaux présentes en profondeur, étaient marginaux, en second lieu.

L'arrêt du pompage dans le puits SHELL 1 n'a pas modifié la répartition des hydrocarbures notamment dans la strate composée par la craie qui n'est pas concernée par la présence de ces composés. De plus les prélèvements d'eau dans cette couche n'ont pas montré d'échappements des hydrocarbures en direction du sud.


Les mesures des perméabilités conduites depuis 2014 sur le foncier ont validé les valeurs qui avaient été retenues par ANTEA dans le cadre des modélisations, et permis d'expliquer que la faible

	ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS PLAN DE GESTION Des parcelles AM 40 et AM 100	Page : 25/74
		Date : 24/05/2019
		N° 16B76-PLMM

perméabilité des alluvions anciennes et récentes, au regard de celle qui caractérise la nappe de la craie, annule quasiment les transferts verticaux.

Il infère de l'ensemble de ces données que le réservoir de la craie et la Seine ne peuvent pas être impactés par la présence des hydrocarbures présents au niveau des alluvions modernes.

Dans le chapitre suivant, il est décrit le comportement et la distribution de la phase hydrocarbonée surnageant dans les alluvions modernes, montré que ces composés ne sont pas mobiles horizontalement, du fait de leur « mobilisation verticale » bi quotidienne. Enfin, dans le contexte global hydrogéologique décrit dans le présent document, il est proposé des épaisseurs résiduelles pour cette phase hydrocarbonée surnageant, à l'issue des travaux en cours, basées sur la double approche « concentration résiduelle à saturation – distribution insulaire des hydrocarbures surnageant ».

	ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS	Page : 26/74
	PLAN DE GESTION	Date : 24/05/2019
	Des parcelles AM 40 et AM 100	N° 16B76-PLMM

SECONDE PARTIE

6. LE PLAN DE GESTION, LES OBJECTIFS DES TRAVAUX

A la cessation de l'activité du site, un diagnostic a été réalisé par la société ANTEA (Ref A71701 B). En conclusion de ce document, ANTEA a rappelé les principes que doit viser un plan de gestion en les mettant en perspective avec les contraintes et les spécificités de l'ancien site pétrolier Petroplus.

ANTEA écrivait ainsi : « la maîtrise des sources de pollution et de leurs impacts est le premier objectif d'une démarche de traitement et doit être « consacrée » dans le plan de gestion. Cette priorisation s'entend si la suppression des sources sol peut être opérée à un coût raisonnable. Dans le cas contraire, les impacts des pollutions résiduelles doivent être maîtrisés et acceptables ».

Sur un site industriel de cette ampleur, seule une analyse globale des enjeux permettra de mettre en œuvre des solutions de réhabilitation pragmatiques et de bon sens, en concertation avec l'ensemble des acteurs qui porteront le projet.

Les deux étapes fondatrices du plan de gestion doivent être :

- La définition d'objectifs de dépollution des milieux impactés. Pour se faire deux approches pourront être mises en œuvre :
 - o La première, à partir d'une Evaluation Quantitatives des Risques Sanitaires qui définira les Concentrations Maximales Admissibles garantissant la comptabilité du milieu avec l'usage retenu ;
 - o La seconde par analogie à des sites industriels équivalents (taille, type d'activités) pour lesquels des seuils de réhabilitation ont été retenus et fait l'objet d'un consensus. On peut penser que cette approche sera privilégiée pour les usages les moins sensibles.
- La réalisation d'un bilan coût/avantage chiffré, qui doit aider les acteurs du projet à trouver le meilleur compromis entre les différentes solutions technico-économiques étudiées ; l'objectif final étant de parvenir au meilleur niveau de protection de l'environnement humain et naturel à un coût raisonnable. A ce stade, les mesures pouvant être évoquées sont :



- Des travaux de confinement des flottants en cas de mobilisation hors site, des pompages écrémage adossés au préalable à des essais pilotes de faisabilité ;
- Des traitements sur site des terres les plus impactées (type biopile) adossés au préalable à des essais pilotes de faisabilité ;
- Des Restrictions et Servitudes d'usage adossées à un suivi environnemental.

Pour cela, la démarche doit se fonder sur une analyse des meilleures techniques disponibles sur le marché (BEST AVAILABLE TECHNOLOGY), applicables à un coût raisonnable, et en tout état de cause qui soient compatibles avec les enjeux de la reconversion. L'approche retenue devra garantir que les impacts potentiels liés à l'éventuelle pollution résiduelle après travaux de remise en état, sont effectivement maîtrisés et admissibles, tant pour les populations que pour l'environnement du site (milieu naturel, eaux de surface ici la Seine et souterraines...). L'élaboration du plan de gestion consiste donc à trouver un compromis acceptable d'un point de vue :


- Technique ;
- Économique ;
- Réglementaire.

En conjuguant mesures de dépollution, dispositions constructives, aménagements particuliers, et, *in fine*, restrictions d'usage, si nécessaire.

Dans le cas de la reconversion de l'ancienne raffinerie Pétoplus, les éléments qui nous sont apparus essentiels pour la définition des objectifs de traitement sont les suivants, sans que l'ordre d'apparition des éléments listés ne corresponde à un ordre de priorité :

- La maîtrise des impacts pour les eaux de la Seine et des eaux circulant dans la couche crayeuse, dans un contexte de fort marnage ;
- Le confinement de la couche hydrocarbonée surnageant au droit des anciennes installations pétrolières ;
- La compatibilité sanitaire du site avec les nouveaux usages, centrés sur de l'activité de type logistique ;
- Les prix de vente du marché foncier pour des usages équivalents ;
- La possibilité d'instituer des restrictions des usages sur le site ;
- Les demandes de la DREAL.

Au même titre que l'appréciation du risque se fonde sur le triptyque :

	ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS PLAN DE GESTION Des parcelles AM 40 et AM 100	Page : 28/74
		Date : 24/05/2019
		N° 16B76-PLMM

- Source de pollution ;
- Voies d'exposition ;
- Cibles.

Le plan de gestion repose sur la triade d'enjeux, suivante :

- Enjeux sanitaires, c'est-à-dire garantie sanitaire entre les concentrations résiduelles et la présence des futurs usagers ;
- Enjeux environnementaux, qui comprennent la réduction des sources de pollution, dans la zone saturée et dans la zone saturée, la maîtrise des voies de transfert, la gestion des impacts sur les différents milieux ;
- Enjeux financiers : un optimum doit être trouvé entre les coûts des travaux de remise en état pour un usage sans restriction et la valorisation des biens construits dans une situation d'usages spécifiques et limités.

La démarche du plan de gestion peut s'appuyer sur différents textes édités par le Ministère et notamment sur le document dont le lien est précisé ci-dessous :

<http://ssp-infoterre.brgm.fr/elaboration-bilans-couts-avantages>

Ce document édité en 2017 et intitulé ELABORATION DES BILANS COUTS/AVANTAGES ADAPTES AUX CONTEXTES DE GESTION DES SITES ET SOLS POLLUES, présente de manière détaillée la démarche d'élaboration du plan de gestion.

Le premier des deux triptyques qui vient d'être rappelé, sert d'assise à la réalisation du plan de gestion. Il faut donc dans une première étape :

- Analyser les possibilités de maîtrise de la source de pollution via des travaux de réhabilitation qui comprennent l'enlèvement, la destruction totale ou partielle de la source de pollution ;
- Analyser les possibilités de limiter les transferts : limitation du transfert : dans les sols, les gaz des sols, les eaux souterraines et superficielles, ou au niveau des bâtiments (mesures constructives) ;
 - o Confinement des polluants par une couche de surface adaptée ;
 - o Immobilisation des polluants dans la matrice, par un traitement physicochimique.
- Analyser la possibilité de modifier les aménagements :
 - o Changement des usages dans le cadre du projet ;

- Changement de l'aménagement du site (adaptation de l'espace dédié au projet par rapport aux pollutions résiduelles sur le site).

La technique de traitement choisie, devra s'attacher à traiter la source de pollution, ou à maîtriser les impacts ou à protéger les cibles, comme l'illustre la Figure 11 suivante. Le mixage de ces trois leviers de gestion est aussi possible.

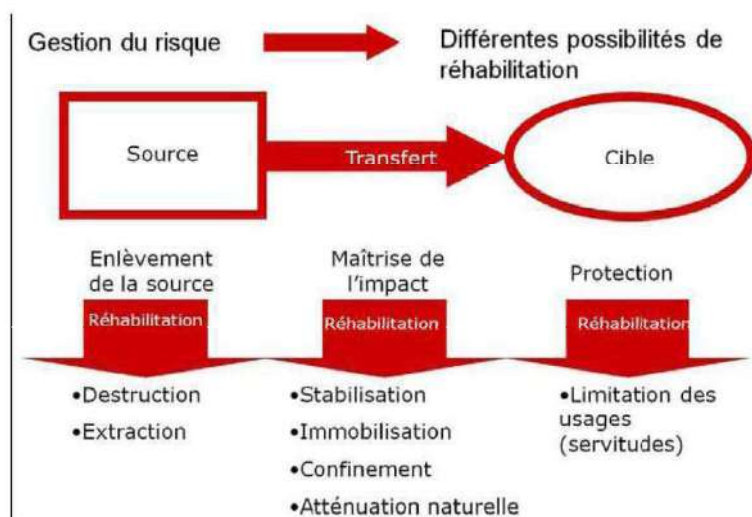



Figure 11 : Stratégie des mesures de gestion d'un site pollué (Nathanail et al., 2002)

Il est évident que la maîtrise de la source de pollution participe à la démarche globale de réduction des émissions de substances responsables de l'exposition chronique des populations et d'amélioration de la qualité des milieux (ce qui est en conformité avec le Plan National Santé Environnement en cours). Ainsi, tout projet qui consiste principalement à retirer une source de pollution est favorable d'un point de vue sanitaire « global ».

Pour autant, le retrait total des sources de pollution sur un site ayant supporté 80 années d'activité de raffinage, impose que soit pris en considération d'un point de vue opérationnel, l'ensemble des conséquences des travaux, en termes d'impacts sur les populations, de nuisances, de bilan carbone et, finalement, que soient proposées des mesures compensatoires face à ces perturbations.

Lorsqu'il n'est pas possible d'enlever la source de pollution dans sa globalité, du fait des techniques disponibles ou pour des raisons évidentes de viabilité économique globale du projet, il convient, néanmoins, de garantir que les impacts provenant des sources résiduelles soient maîtrisés et acceptables pour les populations et l'environnement. Dans ces conditions, la limitation des transferts

	ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS	Page : 30/74
	PLAN DE GESTION	Date : 24/05/2019
	Des parcelles AM 40 et AM 100	N° 16B76-PLMM

doit permettre, en adjoignant des dispositions constructives particulières au projet, si nécessaire, d'autoriser les usages des milieux sans risques excessifs ou, si cela s'avère nécessaire, en restreignant les usages des milieux.

Le fait d'envisager l'enlèvement de la source de pollution, seule, ou de gérer la situation environnementale de reconversion par le biais de la maîtrise de l'impact (neutralisation des voies de transfert par exemple), à un coût économiquement acceptable, revient finalement à considérer différentes options de gestion ou scénarii de gestion. Ces options sont comparées entre elles via des bilans coûts-avantages. L'objet d'un plan de gestion dans le cadre de la remise en état d'un site pollué, est de procéder au bilan coûts-avantages comparatif des différentes approches de gestion possible, actuellement disponibles, pour les différents milieux à réhabiliter.


Une analyse des différentes techniques disponibles doit être réalisée et s'attacher à analyser :

- Son contenu et sa pertinence par rapport aux spécificités inhérentes au site impacté ;
- La maturité de la technique et son domaine d'application ;
- Son efficacité, ses coûts, ses avantages et ses inconvénients.

La dépollution des sites est délicate puisque chaque site est spécifique ce qui veut dire que la réponse à la situation est un mixte spécifique entre les données environnementales, les caractéristiques des polluants, les voies de transfert qui sont liées aux spécificités physico-chimiques des polluants, mais que cette réponse doit aussi tenir compte des usages présents ou futurs développés sur le tènement.

Souvent l'approche dite dichotomique est pratiquée en recherche de solutions à l'équation complexe qui intègre des variables telles que :

- le contenu et la pertinence des techniques par rapport aux spécificités inhérentes au site impacté ;
- Le retrait de la source sol ;
- Le coût de traitement ;
- La gestion des déchets ;
- Les conséquences des servitudes sur la valorisation du foncier ;
- Le bilan carbone des travaux.

	ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS	Page : 31/74
	PLAN DE GESTION	Date : 24/05/2019
	Des parcelles AM 40 et AM 100	N° 16B76-PLMM

Sachant que cette équation ne possède pas de solutions entières exactes. La recherche de solutions à cette équation comprend aussi une démarche de type recherche itérative inverse, lorsque des paramètres sont « encadrés » par des valeurs limites tel que le coût des travaux ou la valorisation du terrain, le tout devant permettre une compatibilité sanitaire pour les futurs usagers du site.

Par ailleurs, pour répondre aux exigences de temps, de coûts, d'efficacité et d'espace, le traitement mis en œuvre est souvent une combinaison, de différentes techniques de dépollution, de mesures constructives et au final, de restrictions d'usage lorsque demeurent sur site des zones qui ne peuvent être exposées à certains usages ou l'être dans des conditions particulières.

Le présent plan de gestion s'inspire des préceptes des différents guides élaborés par le BRGM, et notamment le document intitulé « Définir une stratégie de dépollution - Approche basée sur la masse de polluant et la capacité de relargage d'une pollution » (BRGM/RP-64350-FR Février 2016).

Dans le contexte propre à l'ancienne raffinerie de Pétroplus, le plan de gestion s'attache ici :

- À décrire l'état des connaissances acquises sur les zones concernées par des produits hydrocarbonés surnageant et le comportement des hydrocarbures présents sur le toit des eaux souterraines dans un contexte de fort marnage ;
- À préciser la distribution de ces hydrocarbures dans la zone de battement du marnage ;
- À estimer la capacité de déplacement des produits hydrocarbonés surnageant en fonction du type de produit (viscosité) et de la porosité des sols ;
- À évaluer les possibilités de récupération de ces produits pétroliers en fonction des différents secteurs de l'ancienne zone de raffinage (viscosité des produits et porosité du sol) ;
- À exposer la démarche de modélisation de différentes techniques de pompage envisageables
- À décrire les techniques les plus adaptées qui ont été mobilisées en fonction des hydrocarbures à pomper ;
- À proposer deux épaisseurs résiduelles « objectif » (ERO) de produits surnageant, pour la partie sud et la partie nord de la raffinerie ;
- À caler une concentration résiduelle pour les hydrocarbures dans les sols, pour la zone non saturée, basée sur le calcul de la concentration résiduelle en hydrocarbures, non volatils (C10 - C40) dite à saturation ;
- À proposer des concentrations maximales admissibles pour la zone non saturée, pour différents composés volatils, valeurs issues d'un calcul des risques sanitaires dit prévisionnel



(essentiellement pour le benzène, le naphthalène et les coupes hydrocarbonées comprenant de 6 à 8 carbones) ;

- À proposer la mise en place d'une couche de confinement sur l'ensemble de la parcelle à l'issue des travaux ;
- À retenir un ensemble de restriction d'usage, à l'issue des travaux décrits dans le présent document, afin de sécuriser la réutilisation du foncier.

7. ETAT DES CONNAISSANCES ACQUISES SUR LES ZONES CONCERNEES PAR DES PRODUITS HYDROCARBONES SURNAGEANT ET LE COMPORTEMENT DES HYDROCARBURES PRESENTS SUR LE TOIT DES EAUX SOUTERRAINES DANS UN CONTEXTE DE FORT MARNAGE

A l'issue des travaux d'investigation réalisés par ANTEA entre 2012 et 2013, la Figure 12 ci-dessous a été proposé. Cette figure décrit 3 secteurs présentant des couches de produits hydrocarbonés (LNAPL) non volatils.

Deux secteurs de couleur rose correspondant à une estimation du panache lié à des pertes d'hydrocarbures durant le raffinage (pour une surface estimée à 31 hectares). Le secteur coloré en jaune correspond à une loupe résiduelle d'hydrocarbures issue des pertes survenues dans les années 1985-1990, sur une canalisation localisée dans le nord du stockage du Milthuit.

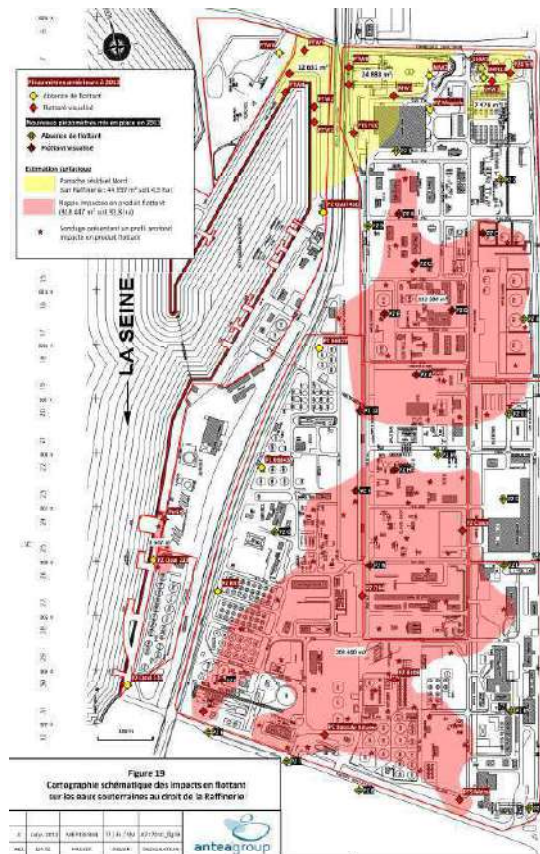


Figure 12 : Cartographie des impacts en couche hydrocarbonée flottant conjecturée par ANTEA en janvier 2014

L'estimation de ces surfaces de nappes de produits hydrocarbonés surnageant découle d'une approche par interpolation statistique, en retenant les valeurs en hydrocarbures mesurées dans les ouvrages piézométriques (valeurs non corrigées).

Les distances entre certains ouvrages, sur la représentation délivrée à la figure 12, sont supérieures à 100 m pouvant conduire à des réponses « statistiques » entre les ouvrages, apparition d'un continuum, par le biais du variogramme utilisé, sans que cette présentation cartographique corresponde à une réalité objective.

Durant les 5 dernières années, entre 2014 et 2019, un nombre important de puits et de piézomètres a été implanté.

Le Tableau 5 présente l'évolution du nombre d'ouvrages implantés sur le site entre 2012 et 2019.

	ANTEA (2012)	GOLDER Associates (2015)	VALGO (2019)	BURGEAP - CEBTP	Nb. total
Nb de Piézomètres / puits	34	7	300	6	347
Nb. de piézairs	5	13	200	-	218
Nb. de sondages	216	100	250	30	596

Tableau 5 : Évolution des ouvrages implantés sur la zone du raffinage entre 2012 et 2019

La Figure 13 expose la localisation de ces différents puits et piézomètres. La densité accrue des ouvrages dans certains secteurs est la conséquence d'une démarche itérative conduisant à trianguler plus densément, les zones présentant des épaisseurs significatives d'hydrocarbures.

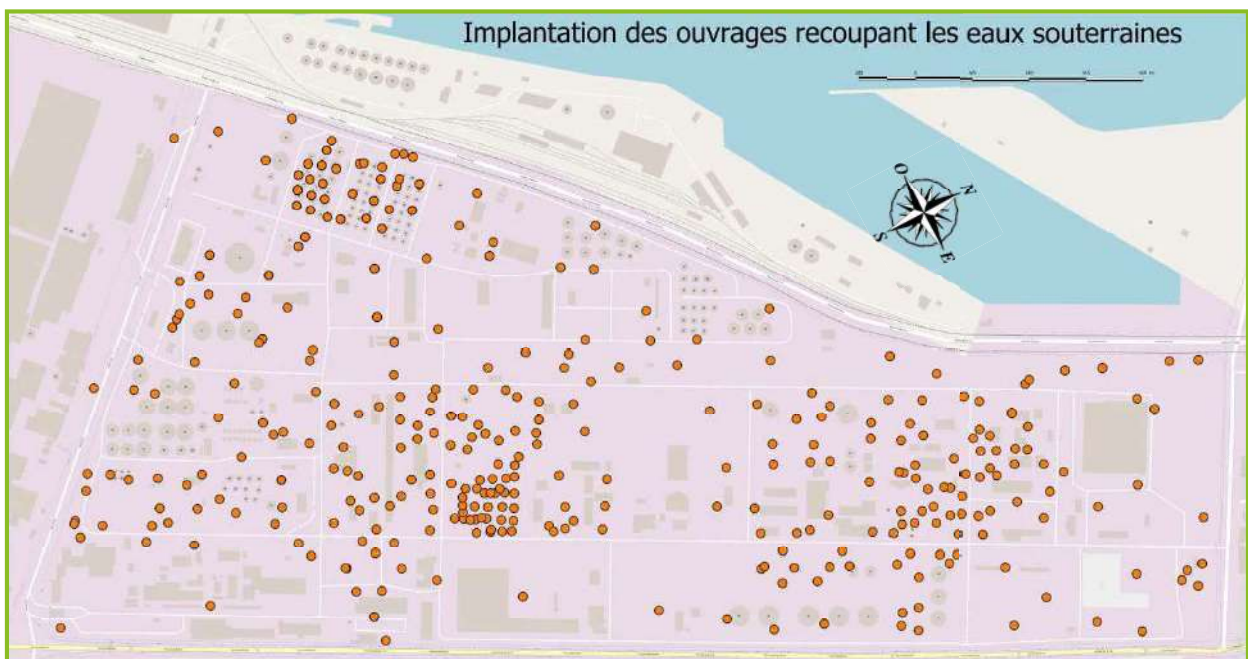


Figure 13 : Répartition des différents puits et piézomètres sur l'emprise de l'ancienne zone de raffinage

Le nombre d'ouvrages implantés permet de diminuer les incertitudes. A ce titre, la distance moyenne entre deux sondages est actuellement de 30 m, et le percentile 80 de ces écartements, est de 41 m.

La répartition horizontale des hydrocarbures surnageant est précisément connue à ce jour.

La Figure 14 est une représentation par interpolation statistique, des épaisseurs d'hydrocarbures mesurées (non corrigées) dans les différents ouvrages présents sur le secteur visé par le présent plan de gestion.

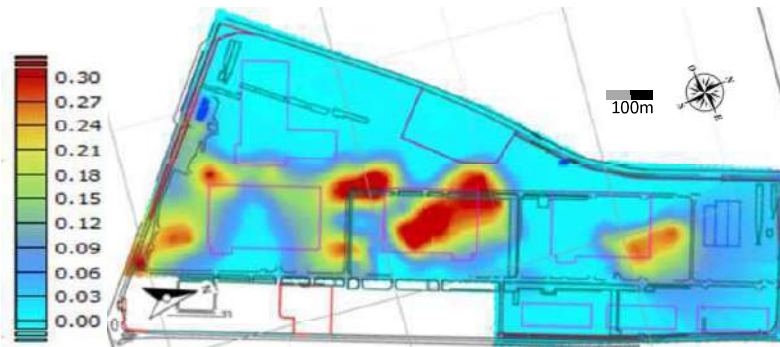


Figure 14 : Représentation statistique des épaisseurs d'hydrocarbures (en mètre) sur l'ancienne zone de raffinage.

8. LA DISTRIBUTION DES HYDROCARBURES DANS LA ZONE DE BATTEMENT DU MARNAGE

8.1. Les données ANTEA


Dans son rapport de janvier 2014 (Réf A71701/B), la société ANTEA présentait les résultats pour déterminer la productivité des ouvrages au cours de tests d'écumage et conséquemment une projection des possibilités de récupération des produits hydrocarbonés surnageant.

Les tests d'épuisement qui ont été réalisés par ANTEA, consistent à purger les piézomètres et à suivre la réalimentation des flottants selon un pas de temps régulier. Les données sont ensuite interprétées pour en déduire la transmissivité des sols aux hydrocarbures.

De la même façon que la présence d'eau dans un puits n'indique pas nécessairement un débit d'exploitation satisfaisant et que seule la transmissivité, produit de la perméabilité et de l'épaisseur saturée est un bon indicateur, la hauteur de flottant dans un puits n'est pas un indicateur fiable de sa mobilité et donc de sa possible récupération.

La récupération des flottants est contrôlée par le type de sol, l'épaisseur de surnageant mobilisable, la saturation du sol aux hydrocarbures et la viscosité des hydrocarbures. La transmissivité du sol aux hydrocarbures est le paramètre intégrant l'ensemble de ces variables, et donc un bon indicateur de la récupération de la phase libre.

La limite théorique de récupération d'un fluide en milieu poreux est la concentration dite à saturation résiduelle. La transmissivité des hydrocarbures décroît avec sa saturation jusqu'à s'annuler lorsque la saturation résiduelle du terrain est atteinte.

	ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS PLAN DE GESTION Des parcelles AM 40 et AM 100	Page : 36/74
		Date : 24/05/2019
		N° 16B76-PLMM

Dans son guide relatif à la définition de critères d'arrêt dans le cadre de la dépollution de sites contaminés par des hydrocarbures flottants, l'ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council)² recommande une gamme de transmissivité autour de $1.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, valeur en-deçà de laquelle les produits hydrocarbonés ne sont plus mobilisables et récupérables par des techniques pneumatiques et hydrauliques.

Les ouvrages qui ont été testés par ANTEA, ont révélé des transmissivités comprises entre 1.10^{-7} et $1.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Si le diamètre des ouvrages et l'influence des marées ont constitué des facteurs limitants pour préciser les données, on comprend immédiatement pour ce qui est du phénomène lié à la marée, que celui-ci est déterminant pour les opérations d'écumage.

L'épaisseur de flottant (ou LNAPL Light Non Aqueous Phase Liquid en anglais) observée dans un puits ou dans un piézomètre ne correspond pas à l'épaisseur réellement présente dans les sols, c'est-à-dire dans la formation aquifère voisine. En effet, les phénomènes de capillarité dans les sols, dus à la faible taille des pores, ont tendance à faire remonter les niveaux des interfaces « air / flottant » et « flottant / LNAPL », à l'image d'un ménisque observable lorsque l'on remplit d'eau un tube à essai.

Dans son rapport de janvier 2014, ANTEA a rappelé que l'épaisseur réelle de flottant se décompose en deux parties :

- l'épaisseur de flottant libre ;
- l'épaisseur de flottant « piégée » dans la frange capillaire par les phénomènes de succion du sol qui ne se manifestent pas dans un puits.


Le professeur-chercheur canadien Lefebvre³ propose un accès à l'épaisseur libre de flottant dans les sols à partir de l'évolution des altitudes des interfaces « air / flottant » et « flottant / eau » à la suite d'une purge de flottant (bail-down test) ce qui conduit à une estimation de l'épaisseur de flottant libre dans les sols.

Cependant, aucune interprétation graphique d'un bail-down test ne permet d'accéder à l'épaisseur de flottant piégée par capillarité au-dessus de l'épaisseur libre.

En janvier 2014, ANTEA concluait que les épaisseurs d'hydrocarbures libres, **donc mobilisables, sur l'emprise de l'ancienne zone de raffinage étaient comprises entre 0,5 et 5,5 cm.**

² ITRC (2009) Evaluating LNAPL remedial technologies for achieving project goals. www.itrcweb.org

³ Écoulement multiphase en milieux poreux, note de cours, Automne 2006. GEO-9602/GLG-65146

	ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS	Page : 37/74
	PLAN DE GESTION	Date : 24/05/2019
	Des parcelles AM 40 et AM 100	N° 16B76-PLMM

ANTEA inférait donc des observations de terrain, que les hauteurs des hydrocarbures mesurées dans les ouvrages ne reflètent pas la réalité de la couche surnageant et devaient être corrigées, d'une part, et que les volumes d'hydrocarbures récupérables étaient faibles, correspondant à la fraction libre et mobile de ces produits, d'autre part.

8.2. Les données VALGO

Nous nous sommes attachés à vérifier la recevabilité des hypothèses et des conclusions d'ANTEA quant à la proportion des produits hydrocarbonés libres dans la zone capillaire. Pour cela nous avons évalué un paramètre déterminant, la concentration résiduelle en hydrocarbures à saturation, au-delà de laquelle les hydrocarbures forment un continuum dans la porosité ouverte du sol et sont donc susceptibles de mobilité. Pour cela nous avons déployé de nombreuses méthodes de terrain, y compris « contacté » visuellement les hydrocarbures à l'aide d'une sonde optique, descendue dans la zone capillaire, afin d'y observer la distribution des hydrocarbures au niveau de la zone de battement de la nappe.

8.3. La concentration résiduelle

Dans le guide du BRGM intitulé « Définir une stratégie de dépollution - Approche basée sur la masse de polluant et la capacité de relargage d'une pollution » (BRGM/RP-64350-FR, Février 2016), il est rappelé qu'une phase pure est présente dans le milieu poreux à partir d'une certaine saturation dite « saturation limite ». À partir de cette saturation limite, et jusqu'à l'atteinte d'une saturation suffisante (dite « saturation résiduelle »), la phase huile (forme pure) est piégée sous forme de gouttelettes dispersées à « l'état de saturation insulaire », alors que la phase eau reste mobile dans la porosité ouverte du sol.

Il est précisé par le BRGM que la phase pure devient mobile à partir du moment où elle est continue dans le milieu poreux. Le domaine de saturation en huile et en eau, dans lequel à la fois la phase huile et la phase eau sont mobiles, est appelé « état de saturation funiculaire ». Lorsque la saturation en huile excède 70 à 80 %, l'eau est immobile, et seule la phase huile migre à « l'état de saturation pendulaire ».

De plus, le BRGM rappelle dans son guide, que les sols grossiers permettent de récupérer davantage de phase flottante. En revanche, si les sols sont fins, dans le cas d'une épaisseur de flottant de 1 m mesurée dans un ouvrage, les pompages ne permettent de récupérer qu'environ 13 % des hydrocarbures détectés.

En conclusion, la phase organique doit être mobile lorsque la concentration en hydrocarbures est supérieure à la concentration résiduelle à saturation, et immobile ou peu mobile, lorsqu'elle est inférieure à cette concentration, comme l'illustre la Figure 15.

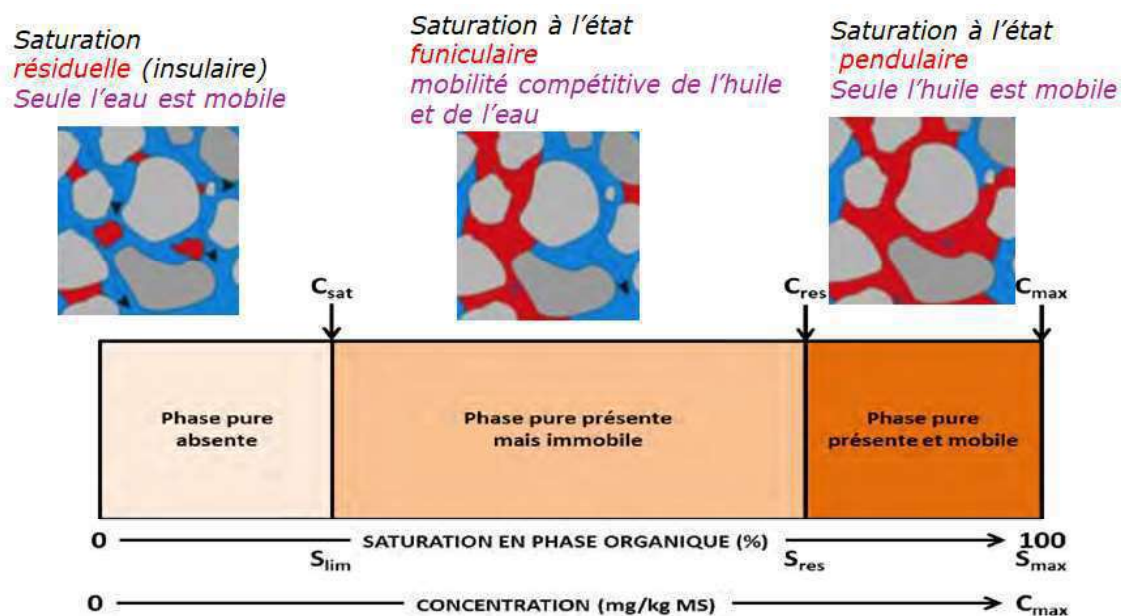



Figure 15 : Distribution des hydrocarbures dans la porosité ouverte du sol en fonction de différentes concentrations « seuils »

Dans ce guide de 2016 du BRGM, il est de plus indiqué que :

- Plus l'épaisseur de flottant est importante, plus la longévité de la zone source est importante ;
- Malgré l'augmentation du volume de sol, associée à une épaisseur de flottant plus importante, le flux des eaux souterraines traversant les produits pétroliers n'augmente pas de façon importante, puisque la perméabilité relative de la phase aqueuse diminue avec l'augmentation de la saturation en LNAPL. Par conséquent, la dissolution de la phase organique n'augmente pas dans ces conditions, même si la longévité de la source s'accroît. Sur le site de l'ancienne raffinerie Pétroplus, les produits hydrocarbonés sont essentiellement des fractions comprenant de 14 à 30 carbones, qui présentent de faibles solubilités. Le risque de solubilisation d'hydrocarbures à partir de la phase LNAPL est donc faible ;
- L'efficacité de la remédiation par pompage du produit pur est limitée, au moins par le paramètre lié à la saturation résiduelle en LNAPL ;

	ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS	Page : 39/74
	PLAN DE GESTION	Date : 24/05/2019
	Des parcelles AM 40 et AM 100	N° 16B76-PLMM

- La différence entre la saturation initiale et la saturation résiduelle en hydrocarbures détermine vraiment l'efficacité d'une remédiation ;
- La saturation initiale est d'autant plus importante que l'épaisseur de flottant est importante.

La situation sur Petit-Couronne concentre les éléments ci-dessus présentés :

- La mise en contact durant une longue période de quantités significatives d'hydrocarbures a conduit à ce que ceux-ci pénètrent dans la porosité fermée du sol, diminuant la possibilité de les mobiliser, et favorisant une forte saturation initiale ;
- Les battements de la marée distribuent les hydrocarbures sous forme de gouttelette, sur une épaisseur importante, modulant la solubilité des hydrocarbures dans l'eau, solubilité physico-chimiquement déjà faible du fait de la nature des hydrocarbures (coupe pétrolière lourde et peu soluble).
- La différence entre la saturation résiduelle et la saturation initiale est d'autant plus petite que les sols sont fins. De ce fait, l'efficacité de la remédiation dans les sols fins est donc plus faible.

Il infère de cet ensemble que la concentration résiduelle à saturation représente une donnée essentielle pour définir des objectifs raisonnables de réhabilitation de l'ancienne raffinerie Pétroplus.

9. DONNEES DE TERRAIN RELATIVES A LA DISTRIBUTION DES HYDROCARBURES DANS LA ZONE DE BATTEMENT DES EAUX SOUTERRAINES

Le site a été découpé en différents lots correspondant au projet de reconversion pressenti, et qui est décrit dans le plan d'aménagement qui sera déposé par VALGO durant l'année 2019. Les secteurs sont présentés sur le schéma 15 ci-dessous, et portent les références de Z2 à Z20.




Figure 16 : Schéma du plan de division par secteur de travaux

La démarche de terrain a visé à acquérir des mesures de terrain objectives pour chacun des secteurs, de sorte à pouvoir calculer les concentrations résiduelles à saturation sur chaque zone. Pour cela les données suivantes ont été relevées :

- La distribution des hydrocarbures dans les sols, à l'aide d'une sonde optique, pour visualiser l'état des hydrocarbures dans la porosité ouverte du sol (insulaire, funiculaire, pendulaire) ;
- La viscosité des hydrocarbures dans le sol de sorte à dresser une carte spécifique à ce paramètre ;
- La transmissivité du sol (mesure à l'aide d'une sonde HPT évoquée au chapitre 1), ainsi que la porosité efficace ;
- Les battements de la nappe dans chaque zone particulière du site et l'impact de ces battements sur les épaisseurs de phase flottante.

A Partir de ces données, un tableau des différentes concentrations résiduelles par secteur, issues de calcul, a été établi (Tableau 6 ci-dessous). Ce calcul a été réalisé pour la zone non saturée dont les résultats sont plus contraignants que ceux obtenus pour la zone saturée (application du principe de précaution). Dans le tableau 6 ci-après les renvois à des numéros de lots, correspondent aux lots dans le cadre de d'aménagement du site.

La concentration résiduelle à saturation (C_{res}) la plus faible calculée étant de 10 375 mg/kg PB, il a été décidé de retenir une C_{res} de 10 000 mg/kg PB pour la zone non saturée. Pour la zone saturée, la mobilité d'une phase hydrocarbonée étant modifiée du fait des rapports des forces différents qui s'y

	ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS PLAN DE GESTION Des parcelles AM 40 et AM 100	Page : 41/74
		Date : 24/05/2019
		N° 16B76-PLMM

exercer, entre les LNAPL, l'eau et la matrice du sol, il a été décidé de retenir aussi cette concentration de 10 000 mg/kg PB pour la zone saturée, même si celle-ci s'avère pénalisante.



**ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS
PLAN DE GESTION**

Page : 42/74

Date : 24/05/2019

N° 16B76-PLMM

Secteur	Lot 2		Lot 3 et 4					Lot 5				Lot 6		
	Z2	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z10	Z11	Z12	Z18	Z19	Z20	Z7 Z8	Z9
Lithologie	sable fin	sable	sable	sable	limono-argileux-sableux	sable	sable fin	sable	sable	limono-argileux-sableux	limons	sable limoneux	sable fin	sable fin
Porosité totale	0,35	0,35	0,35	0,35	0,25	0,35	0,35	0,35	0,35	0,25	0,25	0,25	0,35	0,35
Saturation résiduelle	0,07	0,07	0,07	0,07	0,1	0,07	0,07	0,07	0,07	0,1	0,09	0,08	0,07	0,07
Masse volumique (g/cm³)	0,813	0,874	0,920	0,912	0,901	0,885	0,8	0,83	0,849	0,87	0,87	0,83	0,83	0,85
Viscosité (cP)	0,8	10,83	99,6	52,9	37,35	15,6	2,4	2,4	2,9	10,8	10,8	2,5	2,85	3
Concentration résiduelle (mg/kg PB)	11 065,83	11 897,47	12 518,82	12 411,29	12 507,29	12 043,11	10 888,89	11 297,22	11 555,83	12 083,33	10 875,00	10 375,22	11 297,22	11 569,44

Tableau 6 : Calcul des concentrations résiduelles pour la zone non saturée

9.1. Sonde OIP

Les investigations à la sonde OIP ont mis en évidence que les hydrocarbures se trouvaient sous forme lenticulaire dans la porosité ouverte du sol. Les photographies reportées sur la Figure 17 ci-dessous démontrent que la distribution des HC est uniquement de type lenticulaire, dans la zone de battement des eaux souterraines.

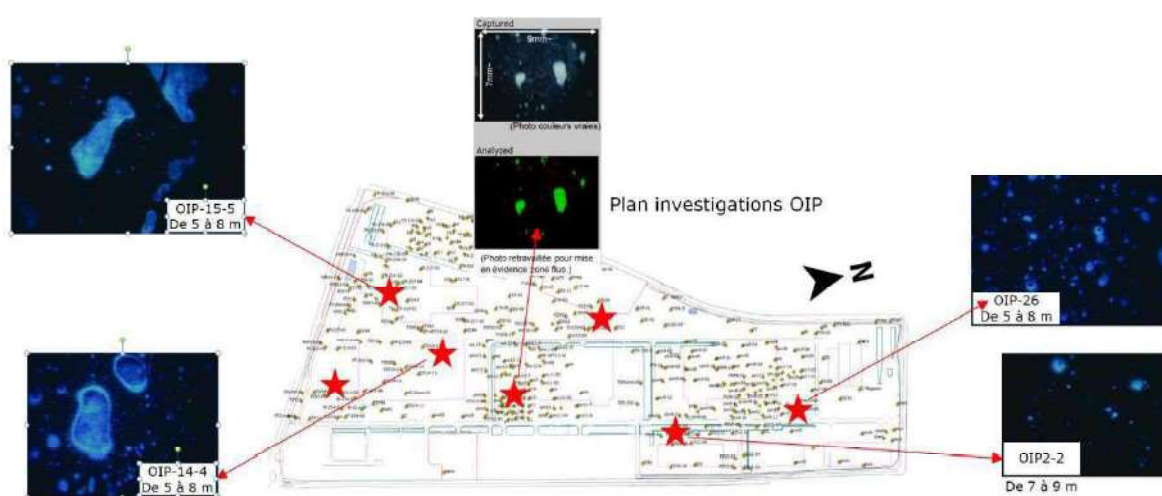



Figure 17 : Images de la distribution des hydrocarbures dans la zone de battement des eaux souterraines capturées à l'aide d'une sonde OIP

Dans les modélisations hydrodispersives conduites par ANTEA en 2013 (Réf A71576/A), il a été rappelé que le régime permanent retenu pour les calculs n'était pas le régime décrivant la réalité des phénomènes apparaissant au sein de la zone saturée, et que le choix d'un régime transitoire serait plus en adéquation avec les phénomènes liés aux mouvements des marées.

Les photographies descriptives de l'état de la phase organique surnageant montrent que le système biphasique ne vient pas à l'équilibre du fait de l'énergie apportée par les marées qui provoque un « régime transitoire » permanent, et que la déstabilisation due aux battements des marées à l'interface eau/hydrocarbures ne permet pas aux hydrocarbures surnageant de constituer un continuum dans la porosité ouverte du sol. **Le cycle bi journalier des marées, conduit à ce que les hydrocarbures ne sont jamais dans une situation de phase LNAPL susceptible de devenir mobile.** Cette distribution vient conforter la proposition de choisir la concentration à saturation comme paramètre déterminant au sein de la zone saturée. **Dans le cas des observations qui ont été menées**

	ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS PLAN DE GESTION Des parcelles AM 40 et AM 100	Page : 44/74
		Date : 24/05/2019
		N° 16B76-PLMM

dans la zone du raffinage, la distribution des hydrocarbures dans la zone saturée a été exclusivement observée à l'état insulaire ne permettant ainsi pas à la phase LNAPL, de se déplacer horizontalement.


En l'état, les hydrocarbures ne sont donc pas mobiles : ANTEA concluait pour les mêmes raisons, dans son rapport de janvier 2014, que l'effet du marnage sur la distribution des hydrocarbures, conduisait à piéger les LNAPL au niveau des sources sol, ne leurs conférant qu'une très faible possibilité d'étalement.

10. LA SELECTION DE METHODES DE RECUPERATION DES PRODUITS

La démarche de récupération des produits pétroliers surnageant, vise principalement à réduire leur volume global, leur présence ne représentant ni un risque de dissolution dans la nappe de la craie ou dans la Seine, ni un risque de déplacement à l'extérieur de l'emprise du site, notamment vers les habitations localisées au sud de Petit-Couronne.

Les techniques classiques de récupération des produits surnageant sont les suivantes :

- Écrémage en fouille ouverte, interceptant le toit des eaux souterraines ;
- Écrémage sélectif de la phase LNAPL à l'aide d'une pompe possédant un suiveur lesté à la densité des hydrocarbures ;
- Pompage par le biais d'une pompe tout fluide récupérant de manière indifférenciée les hydrocarbures et l'eau, sous forme d'émulsion, et séparation de l'émulsion dans un séparateur à hydrocarbures ;
- Pompage de la phase surnageant par un camion hydrocureur en dépression, situé en surface ;
- Pompage produisant un rabattement dans un puits, et écrémage sélectif de la phase accumulée dans le puits de rabattement à l'aide d'une pompe sélective possédant un suiveur lesté à la densité de la phase surnageant ;
- Pompage et écrémage par un système de canule séparatif permettant de générer un rabattement de l'eau en pied de puits et un écrémage des produits dans le cône d'accumulation de l'ouvrage ;
- Écrémage par bande oéophile.

	ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS PLAN DE GESTION Des parcelles AM 40 et AM 100	Page : 45/74
		Date : 24/05/2019
		N° 16B76-PLMM

En fonction de la viscosité des produits pétroliers et de la position des ouvrages sur l'emprise de l'ancienne raffinerie, ces différentes techniques de traitement ont été mobilisées au cours des opérations de pompage.

Une modélisation des pompages a été réalisée à partir d'un algorithme développé par API. En effet, compte tenu du nombre possible de méthodes de traitement et de la diversité des configurations sur le site, liée à la diversité des produits pétroliers et des perméabilités dans la zone de battement des eaux souterraines, l'utilisation d'un outil de simulation est apparue fondamentale en tant qu'aide à la décision d'une méthode, préférentiellement à une autre. En effet, le modèle développé par API permet de prévoir la durée du pompage et son efficacité, une fois correctement calibrés les paramètres descriptifs, en entrée du calcul.

Le modèle de calcul éprouvé que nous avons retenu, est donc le modèle développé par l'institut américain de recherche sur le pétrole (API) dans ce cas le modèle LDRM ou LNALP Distribution and Recovery Model (Ref <https://www.api.org/oil-and-natural-gas/environment/clean-water/ground-water/lnapl/ldrm>).

Le modèle LDRM permet de décrire / simuler des opérations de pompage / écrémage dans un complexe alluvionnaire multicouche, ce qui correspond idéalement au complexe sédimentaire présent au droit de la zone de l'ancienne raffinerie.

Les paramètres que requiert le modèle pour décrire le système dans lequel les pompages vont être réalisés, ont été collectés sur le terrain ou par le biais des mesures en laboratoire, de sorte à diminuer l'incertitude liée au paramétrage. En effet, sans les valeurs spécifiques au système que l'on souhaite modéliser, il faut alors avoir recours aux valeurs issues de bases de données, proposées par le modèle LDRM : les incertitudes induites par l'utilisation des valeurs par défaut conduit nécessairement à une importante incertitude sur le résultat des simulations (durée et efficacité).

Les résultats de la modélisation ont mis en évidence la primauté du pompage/écrémage et de l'extraction double-phase sur les autres techniques envisagées, pour des produits pétroliers de faible à moyenne viscosité (gasoil ou mélange gasoil coupe légère). La Figure 18 ci-dessous présente les courbes de récupération des produits selon deux techniques de traitement, avec une prévision de durée des travaux et du résiduel de phase surnageant, pour des conditions spécifiques de pompage.

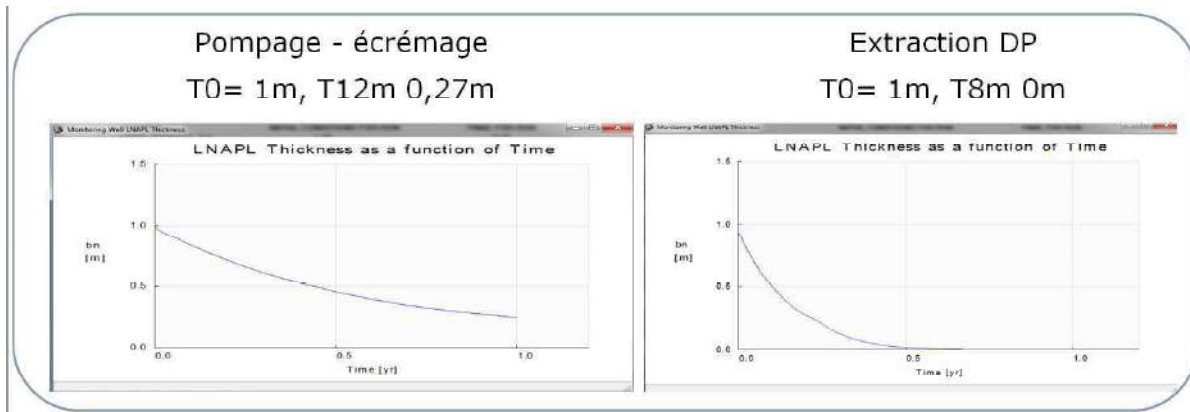



Figure 18 : Courbes de simulation de récupération des LNAPL par deux méthodes de traitement, obtenues par le modèle LDRM de API

Pour autant, la modélisation se fondant sur un régime permanent, au sein d'une géologie multicouche, elle n'intègre pas les effets du marnage : la prévision du modèle nécessite donc la mise en œuvre opérationnelle d'un pompage permettant de neutraliser les marnages, faute de quoi les prévisions des calculs ne peuvent être retenues.

Or, les pompages dans la craie, qui possède une perméabilité en anfractuosités, n'ont pas un effet significatif sur les oscillations des marées, au niveau du toit de la nappe, de sorte que même en pompant à très fort débit dans l'horizon crayeux, cela ne permet pas de s'adjoindre avec les conditions du modèle LDRM (simulation en régime permanent).

Pour y parvenir, dans la partie nord du site, les opérations de pompage/écrémage ont été opérées essentiellement dans la nappe des alluvions modernes (pouvant parfois recouper les alluvions anciennes) en ségrégant cette couche de celle de la craie, à l'aide d'un obturateur pneumatique. Grâce à cet obturateur, l'effet du pompage permet de supprimer les oscillations des marées avec un rapport débit de pompage/rabattement dans l'ouvrage de traitement, d'un facteur supérieur à 30, par rapport à un pompage qui serait opéré au niveau de la couche crayeuse.

Dans la partie sud du site, la présence d'hydrocarbures huileux, ou huile goudronneux, a nécessité un pompage en fouille ouverte, interceptant le toit des eaux souterraines. En effet, la viscosité importante de ces mélanges dans des sols à porosité fine, conduit à une vitesse de pompage particulièrement lente, au sein des puits de pompage de diamètre usuellement utilisés dans les opérations de dépollution.

	ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS	Page : 47/74
	PLAN DE GESTION	Date : 24/05/2019
	Des parcelles AM 40 et AM 100	N° 16B76-PLMM

Autour de l'ancienne usine de production des bitumes, le pompage dans des fouilles a été privilégié. Cette approche permet de s'affranchir de l'effet d'adsorption puissant des mélanges de type huile/bitume, au sein de la fraction fine des sols, et facilite la récupération de cette coupe hydrocarbonée visqueuse, directement en surface du plan d'eau apparu dans la fouille. De plus la profondeur du toit des eaux souterraines dans ce secteur, a permis de retenir cette approche, sans nécessité de conforter les parements des fouilles.

Les hydrocarbures ont été récupérés par écrémage de surface, à l'aide de pompe flottante et sélective, mise en dépression par une pompe à membrane.

Les terres qui ont été excavées lors de l'ouverture des fouilles pour pompage, ont été triées. Les matériaux compris entre la surface du sol et la zone d'imbibition des sols par les hydrocarbures, ont été séparés de ceux composant la zone de battement de la nappe. Dans cette zone de battement les matériaux présentent localement des concentrations égales, ou supérieures, à la concentration résiduelle à saturation. Ces matériaux ne sont pas ré utilisés pour le remblaiement des fouilles.

Dans la zone de l'ancien parc à cuve des huiles, l'implantation de puits de 1 m de diamètre a été retenue. Les pompages dans ces ouvrages ont été réalisés soit à l'aide de camion hydrocureur depuis la surface du sol, soit par le biais de pompes d'écrémage, équipées d'un flotteur lesté à la densité des hydrocarbures, et d'un suiveur de niveau à fort débattement (de sorte à accompagner le mouvement des marées).

Localement, dans ce secteur huile/bitume, des écrémages à l'aide d'une bande oléophile ont été opérés.

Synthèse des méthodes possibles de traitement de la zone saturée

Le Tableau 7 ci-après s'attache à comparer les différentes techniques existantes, et leur faisabilité en fonction, notamment, des caractéristiques des polluants (viscosité), de la géologie du site, des objectifs de réhabilitation, du délai de réalisation propre à chacune de ces méthodes.

	ANCIENNE RAFFINERIE PETROPLUS PLAN DE GESTION		Page : 48/74
			Date : 24/05/2019
			N° 16B76-PLMM

Traitement existant	Type de polluant	Viscosité polluant	Caractéristiques physico-chimique du polluant	Géologie	Efficacité	Délai de réalisation	Nuisances en cours de chantier	Bilan carbone	Coût moyen
Traitement par oxydation	HC dissous	-	++	Variable	++	+	++	++	m ³ eau 10€
Traitement par air en puits	HC dissous et biodégradable	-	++	Variable	++	+	++	++	m ³ eau 3€
Écrémage seul en puits	LNAPL	Moyenne à forte	++	Variable	++	+	++	++	m ³ LNAPL 190€
Écrémage seul en fouille ouverte	LNAPL	Forte	++	Variable	++	++	++	++	m ³ LNAPL 150€
Pompage écrémage	LNAPL et HC dissous	Moyenne	++	Variable	++	++	++	++	m ³ LNAPL 200€
Écrémage par bande oléophile	LNAPL	Forte	++	Variable	++	++	++	++	m ³ LNAPL 150€
Pompage tout fluide	LNAPL et HC dissous	Moyenne	+	Variable	+	++	++	++	m ³ LNAPL 150 € m ³ eau 5€

Tableau 7 : Comparaison avantage/limite/coût de différentes de traitement de la zone saturée