

PETROPLUS
 Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
 Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

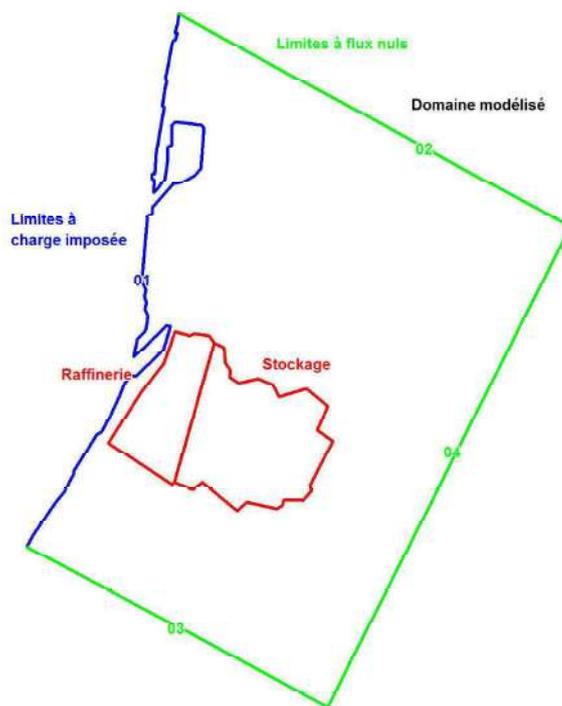


Figure 12 : Conditions aux limites imposées dans le modèle sur l'ensemble des couches

2.5 Paramètres hydrodynamiques

2.5.1 Perméabilités

La perméabilité d'une formation est son aptitude à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient de charge hydraulique. Les formations du site sont dites aquifères car elles sont suffisamment perméables pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine.

► Craie

Plusieurs pompages d'essai ont été réalisés au droit de SHELL 6 et SHELL 1 permettant d'obtenir des valeurs de la perméabilité de l'aquifère crayeux aux environs de ces ouvrages. Les résultats de ces pompages sont tirés des études et travaux suivants :

- Résultats des pompages d'essais sur le forage F6 de la raffinerie de Petit-Couronne (76), BRGM, 1990 ;
- Contrôle de l'influence du pompage de confinement sur le forage SHELL 6, Société Shell, Raffinerie de Petit-Couronne (76), BRGM, 1992 ;
- Pompage d'essai dans le puits SHELL 1, rapport de travaux, Shell Raffinerie de Petit-Couronne (76), ENVIROMAX, 1994 ;
- Puits d'exploitation industrielle F1, diagnostic et réhabilitation de l'ouvrage, Couronnaise de Raffinage, Antea Group, 2001.

PETROPLUS
Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

Les résultats de ces pompages sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Résultats des pompages d'essai réalisés au droit de SHELL1 et SHELL6 entre 1990 et 2001

	SHELL 1		SHELL 6
	Pompages par paliers, 2001	Pompage longue durée, 1994	Pompage longue durée, 1992
Epaisseur efficace	30 m (réhabilitation de l'ouvrage)	60 m	45 m
Transmissivité (T) ou Débit spécifique (Q/s) ⁴	$2,8.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$	$8,5.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$	$6.10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$
Perméabilité de l'aquifère (K =T/e)	$9,3.10^{-4} \text{ m/s}$	$2,8.10^{-3} \text{ m/s}$	$1,3.10^{-2} \text{ m/s}$

Ainsi, la perméabilité de l'aquifère crayeux dans le secteur d'intérêt autour de SHELL 1 peut-être évaluée entre 1.10^{-3} m/s et 3.10^{-3} m/s . **Une valeur de 1.10^{-3} m/s est initialement affectée à la craie dans le modèle (couche 4).**

► Alluvions anciennes

Des pompages d'essai longue durée ont été réalisés au droit d'ouvrages W1, W2, W5 situés au nord de SHELL 6 et qui n'existent plus. Ces ouvrages captent simultanément les alluvions anciennes et la craie. Les résultats de l'interprétation de ces pompages à l'aide du logiciel ISAPE⁵ sont présentés dans le Tableau 3 et permettent d'obtenir une indication sur la perméabilité des alluvions anciennes dans le secteur d'étude.

Tableau 3 Résultats des pompages d'essai réalisés au droit de W1, W2 et W5 en 1991

	W1	W2	W5
Epaisseur efficace	20 m	15 m	10 m
Transmissivité (T)	$2,05.10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$	$8.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$	$2.10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$
Perméabilité de l'aquifère (K =T/e)	1.10^{-2} m/s	$5,3.10^{-3} \text{ m/s}$	2.10^{-2} m/s
Coefficient d'emménagement (S)	1.10^{-2}	5.10^{-3}	1.10^{-3}

Globalement la perméabilité de l'aquifère capté par ces ouvrages, alluvions anciennes et craie, est du même ordre de grandeur que celle de la craie au droit de SHELL 6, soit 1.10^{-2} m/s . En l'absence de caractérisation spécifique des alluvions anciennes, ces dernières étant constituées de sables et graviers a priori plus perméables que la craie fissurée, **une perméabilité de 1.10^{-2} m/s est initialement affectée à la couche 3 dans le modèle.**

⁴ Le débit spécifique obtenu lors d'un pompage, rapport du débit Q par le rabattement observé s, permet d'obtenir un ordre de grandeur de la transmissivité de l'aquifère capté

⁵ Source : Campagne de pompage d'essai - interprétation des résultats - Raffinerie Shell Petit-Couronne – BRGM - 1991

PETROPLUS
Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

► Alluvions modernes

Limons argileux

La perméabilité des limons argileux peut être évaluée par l'interprétation de pompages d'essai longue durée réalisée à l'aide du logiciel ISAPE sur des piézomètres captant les limons argileux des alluvions modernes du site GPN de Grand Quevilly (76). Ce site est situé à 3,5 km au nord de la zone modélisée, également en rive gauche de la Seine⁶. La perméabilité des limons argileux varie ainsi de 2 à 3.10^{-6} m/s. **Une perméabilité de 1.10^{-6} m/s est donc initialement affectée à la couche 2 dans le modèle.**

Par ailleurs, le caractère stratifié des dépôts observés dans les coupes lithologiques des ouvrages du site GPN implique par ailleurs probablement une anisotropie verticale non négligeable de la perméabilité de cette formation. La nature des limons argileux sur le site Petroplus étant vraisemblablement similaire, **une anisotropie verticale de 0,5 est initialement affectée à la perméabilité de la couche 2 dans le modèle.**

Sables limoneux

En absence de tests hydrauliques concernant spécifiquement les sables limoneux sus-jacents aux limons argileux, on se réfère aux documents bibliographiques qui donnent des valeurs de perméabilités de l'ordre de 10^{-5} m/s (cf. Tableau 4). **Une perméabilité de 1.10^{-5} m/s est donc initialement affectée à la couche 1 dans le modèle.**

Tableau 4 : Perméabilité à saturation des sols type (source : Johnson & Ettinger, 2004).

Soil texture, USDA	Class average saturated hydraulic conductivity, cm/h
Sand	26.78
Loamy sand	4.38
Sandy loam	1.60
Sandy clay loam	0.55
Sandy clay	0.47
Loam	0.50
Clay loam	0.34
Silt loam	0.76
Clay	0.61
Silty clay loam	0.46
Silt	1.82
Silty clay	0.40

⁶ Source : Rapport Antea Group A66006/B - Modélisation hydrodynamique et hydrodispersive du comportement de l'arsenic résiduel en nappe - Projet de dépollution des sols et de la nappe impactés par de l'arsenic au droit du site GPN de Grand Quevilly (76) - juin 2012

2.5.2 Coefficients d'emmagasinement et porosité des aquifères

Nous avons vu précédemment que les charges hydrauliques des nappes d'eau contenues dans les formations modélisées dépendent des marnages de la Seine, qui ont lieu 2/3 fois par jour. Pour modéliser la dynamique du système, il est donc souhaitable de réaliser des simulations en régime d'hydraulique transitoire.

Pour cela, il est nécessaire de définir le coefficient d'emmagasinement des couches modélisées. Le coefficient d'emmagasinement (S) d'un aquifère libre est le rapport du volume d'eau libérée ou emmagasinée par unité de surface, à la variation de charge hydraulique correspondante.

Par ailleurs, comme expliqué précédemment, le rapport de la transmissivité des aquifères (T) sur le coefficient d'emmagasinement (S), appelé diffusivité (D), détermine la propagation des variations marégraphiques du niveau de Seine dans les formations modélisées.

Les coefficients d'emmagasinement des alluvions anciennes et de la craie obtenus par interprétation des pompages d'essai longue durée au droit des ouvrages W1, W2 et W5 en 1991 sont compris entre 1.10^{-3} et 1.10^{-2} (cf. Tableau 3). **Un coefficient d'emmagasinement de 1.10^{-2} est donc initialement affecté aux couches 3 et 4 dans le modèle.**

Aucune évaluation des coefficients d'emmagasinement des alluvions modernes n'est disponible. **Les alluvions modernes étant limoneux, un coefficient d'emmagasinement plus faible de 1.10^{-3} est initialement affecté aux couches 1 et 2 dans le modèle.**

Pour les simulations en transport et la prise en compte de la convection de la pollution dissoute dans les eaux souterraines, il est nécessaire de définir la porosité cinématique (ω) des formations modélisées, qui équivaut au rapport de la vitesse de déplacement moyenne de l'eau en mouvement dans l'aquifère. Cette porosité cinématique est généralement déterminée par traçage. Or sur le site, aucun traçage n'a été réalisé. **La porosité cinématique des couches sera donc considérée assimilable à la porosité efficace qui, en nappe libre, est équivalente au coefficient d'emmagasinement.**

2.6 Teneurs en hydrocarbures mesurées dans les eaux souterraines du site (indice C5-C10)

2.6.1 Concentrations mesurées

Les eaux souterraines du site ont fait l'objet d'analyses en mai 2012 et en avril 2013, l'ouvrage SHELL 1 étant alors en fonctionnement. Deux types d'analyses sont disponibles :

- Les piézomètres sur lesquels aucun hydrocarbure en phase flottante n'est présent : les résultats d'analyses sont issus d'une campagne de prélèvement réalisée en mai 2012. Les paramètres recherchés ont été les hydrocarbures HCT (C5-C40), les composés aromatiques volatils (CAV), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les composés organo-halogénés et les éléments traces métalliques. Les résultats présentés en annexe 3 montrent que les plus fortes concentrations enregistrées sont sur la fraction C5-C10 des hydrocarbures.
- Les piézomètres sur lesquels des hydrocarbures en phase flottante étaient présents. Les analyses ont été réalisées sur des prélèvements d'eau sous phase libre en avril 2013 (P3, PZ Bascule, PZ Claus). Compte tenu que la modélisation de la phase flottante est très complexe, ces 3 ouvrages ont été sélectionnés afin de disposer du niveau d'impact sous le panache. Les analyses ont portées sur les hydrocarbures HCT (C5-C40), les composés aromatiques volatils (CAV). Les résultats montrent les mêmes tendances que ceux obtenus en 2012.

Le Tableau 5 présente les résultats des analyses en hydrocarbures indice C5-C10 (fraction aliphatique et aromatique des Hydrocarbures Totaux – HCT), pour lesquels les concentrations les plus élevées ont été mesurées dans les eaux souterraines. La Figure 13 présente la localisation des ouvrages au droit desquels des teneurs en C5-C10 ont été mesurées, avec indication de la nappe captée. Aucune analyse n'a été réalisée en Seine.

Tableau 5 : Concentrations en hydrocarbures indice C5-C10 mesurées au droit du site entre mai 2012 et avril 2013 (SHELL1 en fonctionnement)

Point de mesure	Nappe captée	Concentration en HCT indice C5-C10 (µg/l)	Date mesure	Avec/sans flottant
PZ B851	Craie	1 490	mai-12	sans
PTS FAREU	Alluvions anciennes + Craie			
PZ B850	Craie			
PZ B845	Alluvions anciennes + Craie	520	mai-12	sans
P4	Alluvions anciennes + Craie	727	mai-12	sans
PZ GALERIE 2	Alluvions anciennes + Craie	1 600	mai-12	sans
PZ B421	Craie	68	mai-12	sans
LM1	Craie			
P3	Alluvions anciennes + Craie	192	avr-13	avec
PZ B41	Alluvions modernes	< 50	mai-12	sans
PZ B6843	Alluvions modernes	135	mai-12	sans
PZ B6827	Alluvions anciennes	4 000	mai-12	sans
PZ BASCULE	Alluvions modernes	1 200	avr-13	avec
PZ DB4	Alluvions anciennes			
PZ B308	Alluvions anciennes			
PTS METAL	Alluvions anciennes + Craie			
SHELL 1	Craie			

PETROPLUS
 Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
 Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

Point de mesure	Nappe captée	Concentration en HCT indice C5-C10 (µg/l)	Date mesure	Avec/sans flottant
PZ CLAUD	Alluvions anciennes + Craie	1 214	avr-13	avec
PZ MAGASIN	Alluvions anciennes + Craie	< 500	mai-12	sans
MW2	Alluvions anciennes + Craie			
SHELL 4	Craie			
SHW2	Alluvions anciennes + Craie			
PZ4 TER	Alluvions anciennes + Craie			
PZ QUAI300	Alluvions modernes	< 500	mai-12	sans
PZ QUAI460	Alluvions anciennes	204	mai-12	sans
PTS PETIT BASSIN	Alluvions modernes			
PTW2	Alluvions modernes			
PTW3	Alluvions modernes			
PTW4	Alluvions modernes			
PTW5	Alluvions modernes			
PZ SDC	Alluvions anciennes			
SHELL 6	Craie			
PZ4 SIREC	Alluvions modernes			
PZ3 SIREC	Alluvions modernes			
POINT EN SEINE 1				
PZL BM	Alluvions anciennes			
PZ DOCK	Alluvions anciennes + Craie			
PZ NORMANDIE	Craie			
PZ CORNEILLE	Alluvions anciennes			
PZ ATELIERS	Alluvions anciennes			

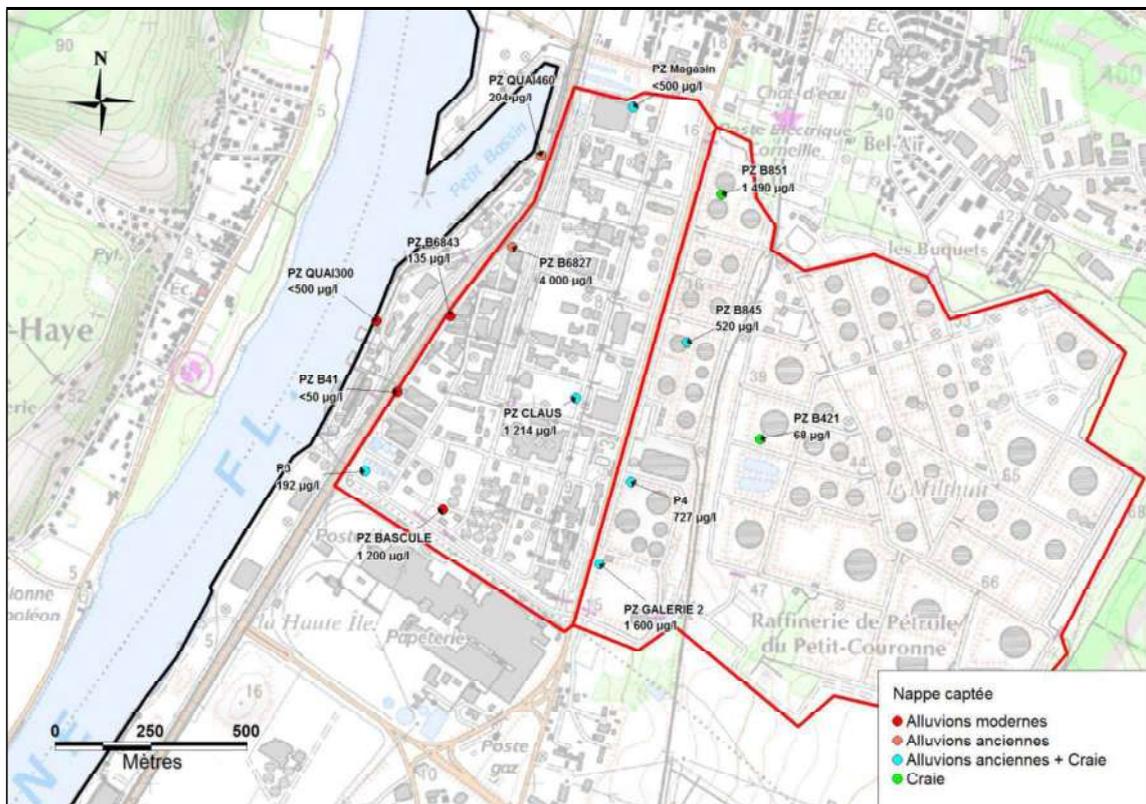


Figure 13 : Concentrations mesurées en hydrocarbures (indice C5-C10) au droit des piézomètres du site entre mai 2012 et avril 2013 – SHELL1 en fonctionnement

3 Calage hydrodynamique

3.1 Objectifs

La phase de calage hydraulique consiste en une estimation du jeu de paramètres hydrodynamiques (recharge, perméabilités, coefficients d'emménagement et charges imposées aux limites) permettant de restituer au mieux les grandes tendances des écoulements et la « réactivité » de la nappe, telles que l'on peut les appréhender au vu des données disponibles.

Comme cela a été montré au chapitre 2 Construction du modèle, un des éléments principaux gouvernant les écoulements des eaux souterraines au droit du site est la dynamique des marées de Seine, phénomène éminemment transitoire. Or en régime d'hydraulique permanente, il n'est pas possible d'intégrer les fluctuations piézométriques des nappes engendrées par les variations marégraphiques de la Seine. Afin d'ajuster au mieux les paramètres hydrodynamiques des couches du modèle pour restituer ces phénomènes, il a donc été décidé de réaliser un calage en régime d'hydraulique transitoire. Par rapport à notre proposition initiale qui ne prévoyait que l'utilisation d'un régime d'hydraulique permanente, l'utilisation d'un régime d'hydraulique transitoire doit donc permettre d'augmenter la capacité prédictive du modèle et donc sa robustesse.

L'objectif principal du calage est alors de reproduire les courbes d'évolution des niveaux d'eau enregistrés dans les 3 piézomètres (Pz Quai 300, Pz B41 et Pz B6827) et au droit de SHELL 1 à l'arrêt entre le 29 mai 2013 et le 03 juin 2013 (cf. Figure 8).

3.2 Méthodes de calage

3.2.1 Calage en régime d'hydraulique transitoire

Pour la mise en œuvre d'un régime d'hydraulique transitoire, des pas de temps sont introduits dans le modèle. Afin de limiter les phénomènes de dispersion numérique dans les résultats qui peuvent entraîner des erreurs significatives, il est nécessaire de choisir une durée de pas de temps adaptée au problème. Les résultats obtenus pour les charges hydrauliques simulées sont d'autant plus précis que la discrétisation temporelle est fine, c'est-à-dire que le nombre de Courant sera petit. Ce dernier est défini comme suit pour une maille de longueur dx :

Nombre de Courant : $Cr = u dt / dx$, où u est la vitesse microscopique de l'écoulement dans la maille et dt la durée d'un pas de temps. Avec $u = [K.i] / \omega$ où :

- K est la perméabilité de l'aquifère (m/s),
- i est le gradient hydraulique de la nappe (%),
- ω est la porosité de l'aquifère (%).

En prenant une perméabilité de 10^{-2} m/s (valeur maximale), un gradient de 1%, une porosité de 1% (valeur faible), et une taille de maille de 20 m, et en prenant un pas de

*PETROPLUS
Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe*

temps de 1h afin de garder un temps de calcul raisonnable, le nombre de Courant est de 1.8 ce qui est satisfaisant.

La Figure 15 présente les charges imposées au droit de la Seine (limite 01, cf. paragraphe 2.4 Conditions aux limites) sur un cycle de 36 heures, soit 36 pas de temps, afin de recréer les cycles marégraphiques observés sur cette période.



Figure 15 : Charges imposées au droit de la Seine pendant 36 heures dans le modèle en régime d'hydraulique transitoire

3.2.2 Optimisation du calage

Pour le calage des paramètres hydrodynamiques, l'option MARTHE de « calage automatique » a été mise en œuvre sur la base de la note technique NT EAU 2010/02 de mars 2010. D'après ce rapport « cette option permet d'optimiser tout type de paramètre utilisé dans les calculs (perméabilité, coefficient d'emmagasinement, facteur retard, ...), en s'appuyant sur tout ce qui est mesurable (charges, débits de sources, débits en rivières, débits de drain, concentrations, teneurs en eau ...). Cette fonctionnalité est opérationnelle pour tous les schémas de calcul, en régime permanent et transitoire. ».

Dans le cadre du présent modèle, le calage automatique a consisté à optimiser en plusieurs étapes les paramètres suivants des couches modélisées :

- La perméabilité ;
- Les coefficients d'emmagasinement.

PETROPLUS
Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

Les historiques d'observation utilisés pour le calage automatique sont les chroniques des niveaux d'eau mesurés sur les ouvrages Pz B41, Pz Quai 300, Pz B6827 et SHELL1 sur 36 heures :

- Pz B41 : du 29/05/2013 à 15h43mn06s au 01/06/2013 à 03h43mn06s ;
- Pz B6827 : du 29/05/2013 à 15h43mn16s au 01/06/2013 à 03h43mn16s ;
- Pz Quai 300 : du 29/05/2013 à 15h44mn44s au 01/06/2013 à 03h44mn44s ;
- SHELL 1 : du 01/06/2013 à 15h41mn42s au 03/06/2013 à 03h41mn42s ;

Les charges imposées au niveau de la Seine sont celles présentées en Figure 15, correspondantes aux niveaux mesurés entre le 29/05/2013 à 15h42mn08s et le 01/06/2013 à 03h42mn08s. Ainsi, les niveaux mesurés dans SHELL 1 utilisés pour le calage ne sont pas synchrones avec les niveaux de Seine observés sur la même période⁷. Par défaut, il y aura donc un écart entre les données simulées sur SHELL 1 et les données observées utilisées pour le calage.

Le calage automatique est ensuite réalisé par zones : au sein de chaque zone, des valeurs minimales et maximales des paramètres à optimiser sont définies au démarrage du calage.

3.3 Résultats

3.3.1 Travail par zones

Un des paramètres à modifier pour caler le modèle est la géométrie des différentes zones de paramètres hydrodynamiques, en plus de la valeur qui leur est affectée

Afin de prendre en compte les hétérogénéités dans les paramètres hydrodynamiques des formations modélisées, en particulier pour compte de l'observation des chroniques piézométriques résultant du suivi en continu des niveaux dans les piézomètres du site, des zones ont donc été créées pour chaque couche :

- Pour les couches 1 et 2 composant les alluvions modernes, le même zonage présenté en Figure 16 a été constitué :
 - La zone 1 correspondant à la couche dans son ensemble ;
 - Pour chaque piézomètre équipé d'un enregistreur et pour lesquels une chronique piézométrique a été obtenue, une zone a été définie sur l'ensemble de l'extension des alluvions modernes perpendiculairement à la Seine. Dans chacune de ces zones, une « zone bis » le long de la Seine a été créée afin de définir un éventuel colmatage des berges ;
- Pour la couche 3 : aucun zonage n'a été constitué ;
- Pour la couche 4 : deux zones ont été créées pour traduire la plus faible fissuration de la craie sous plateau, et donc sa productivité, par rapport à la vallée de Seine (cf. Figure 17).

⁷ Lors de l'installation des enregistreurs, un problème sur SHELL1 n'a pas permis d'utiliser l'enregistreur entre le 29/05 et le 01/06

PETROPLUS
 Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
 Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

Le nombre de zones et leur extension présentés sur les figures ci-après résultent des calages automatiques successifs réalisés.

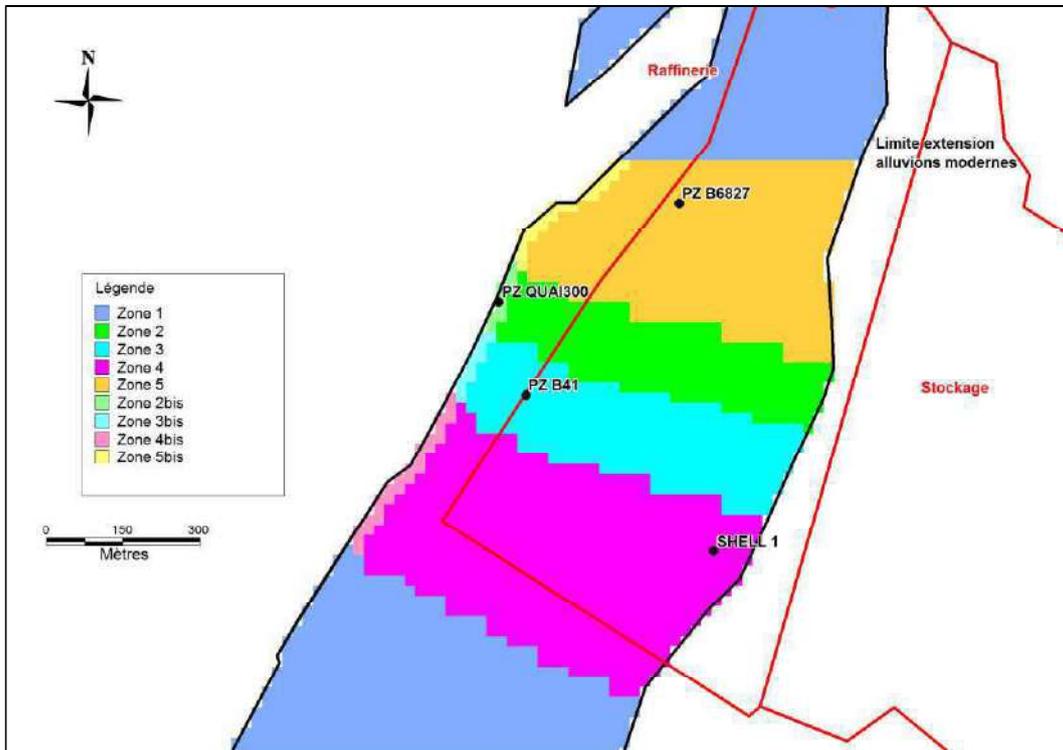


Figure 16 : Zonage des paramètres hydrodynamiques des couches 1 et 2 (alluvions modernes)



Figure 17 : Zonage des paramètres hydrodynamiques de la couche 4 (craie)

PETROPLUS
 Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
 Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

3.3.2 Perméabilités

Les perméabilités ont finalement été affectées aux zones suite aux calages automatiques successifs réalisés. Au sein de chaque zone, les valeurs minimales et maximales des paramètres à optimiser ont été fixées au démarrage du calage afin de rendre compte des chroniques observées sur les piézomètres tout en gardant des valeurs physiquement acceptables.

La Figure 18 présente les perméabilités finalement affectées par zone dans la couche 1 :

- Une perméabilité de $1,74 \cdot 10^{-5}$ m/s est finalement affectée aux sables limoneux sur l'ensemble du modèle, en dehors du secteur d'intérêt autour de SHELL 1 ;
- Les zones créées dans le secteur SHELL 1 ont finalement une perméabilité plus forte, comprise entre $4,51 \cdot 10^{-5}$ m/s et $4,99 \cdot 10^{-5}$ m/s ;
- Dans les zones 2bis et 5bis, la perméabilité est au contraire plus faible, de $7,99 \cdot 10^{-6}$ m/s, tandis que les 3bis et 4bis elle est réduite d'un facteur 10 supplémentaire de $5 \cdot 10^{-7}$ m/s. La gamme de valeur attribuée à cette zone pour le calage a été volontairement élargie pour optimiser ce dernier. La valeur finalement attribuée semble un peu faible par rapport à la lithologie des sables limoneux même si localement, au droit de Pz B41, les niveaux observés sont nettement supérieurs à la Seine (cf. Figure 8) ce qui pourrait être dû à une perméabilité faible en bordure de Seine et donc un colmatage fort.

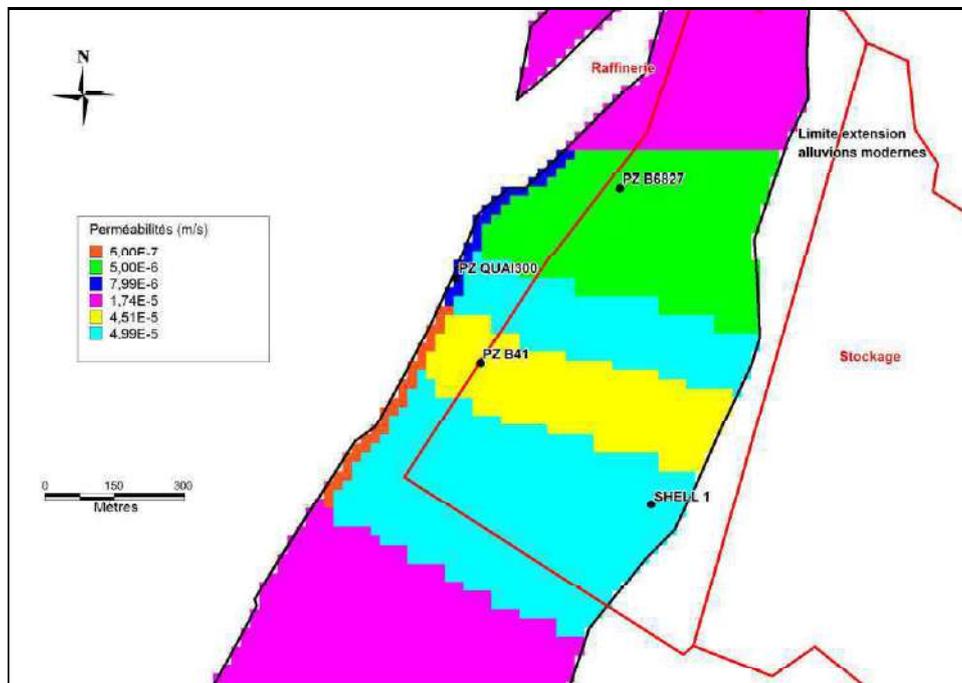


Figure 18 : Perméabilités affectées aux sables limoneux (couche 1)

PETROPLUS
 Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
 Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

La Figure 19 présente les perméabilités finalement affectées par zone dans la couche 2 :

- Une perméabilité de $1,00 \cdot 10^{-6}$ m/s est finalement affectée aux limons argileux sur l'ensemble du modèle, en dehors du secteur d'intérêt autour de SHELL 1, soit la valeur définie avant le calage ;
- La perméabilité finalement affectée aux zones créées dans les secteurs de SHELL 1 est globalement plus faible, de $5,74 \cdot 10^{-7}$ m/s autour de Pz B6827 et de $1,49 \cdot 10^{-7}$ m/s autour de Pz B41. La perméabilité affectées aux limons argileux est encore plus faible dans la zone de SHELL 1, de $3,00 \cdot 10^{-8}$ m/s et dans la zone du Pz Quai 300, de $4,60 \cdot 10^{-8}$ m/s. La gamme de valeur attribuée à ces deux zones pour le calage a été volontairement élargie pour optimiser ce dernier.
- Les valeurs de perméabilité finalement affectées dans les « zones de colmatage » varient d'un facteur 100 : de $4,99 \cdot 10^{-6}$ m/s à $7,01 \cdot 10^{-9}$ m/s. En effet, la gamme de valeur attribuée à ces zones pour le calage a également été volontairement élargie pour optimiser ce dernier.

Aucune information lithologique fine, spatialisée et profonde n'est disponible pour valider la variabilité du champ de perméabilité dans les limons argileux. La présence de palplanches en bordure de Seine pourrait également expliquer les très faibles perméabilités obtenues dans la zone de colmatage du Pz B41.

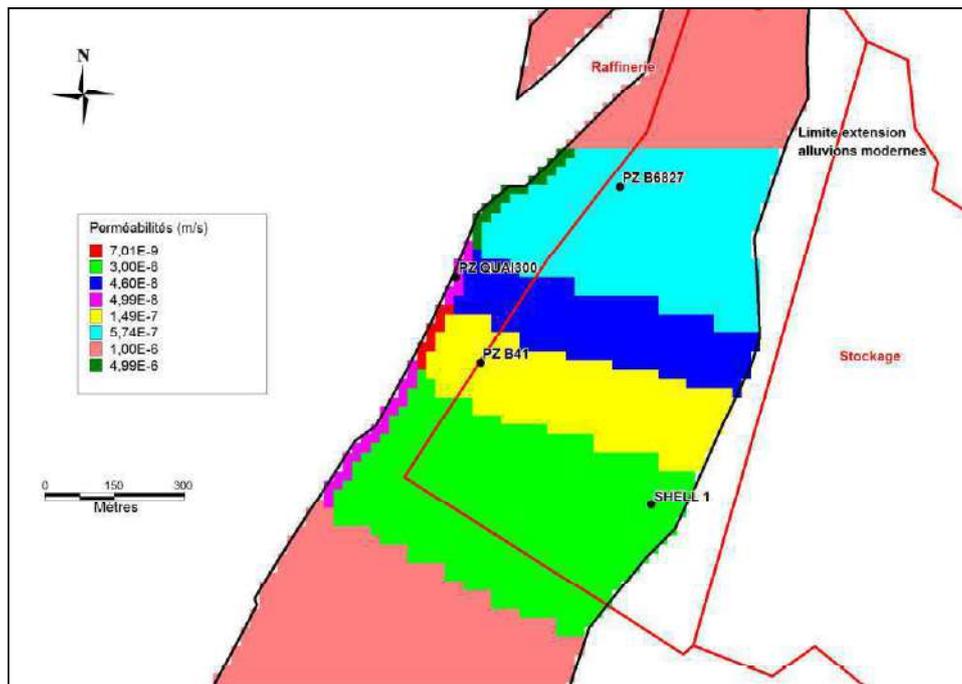


Figure 19 : Perméabilités affectées aux limons argileux (couche 2)

La perméabilité finalement affectée aux alluvions anciennes (couche 3) est uniforme sur l'ensemble du modèle, de $5 \cdot 10^{-3}$ m/s, soit plus faible que la valeur initialement affectée à cette formation.

Enfin, la Figure 20 présente les perméabilités finalement affectées par zone dans la craie (couche 4) :

PETROPLUS
Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

- la perméabilité affectée à la craie dans la vallée de Seine est finalement de 6.10^{-3} m/s, soit plus forte que la valeur obtenue par interprétation du pompage longue durée réalisé en 1994 sur SHELL 1 mais plus faible que celle obtenue sur SHELL 6 (cf. Tableau 2). Cette valeur reste physiquement acceptable ;
- la perméabilité affectée à la craie sous coteau reste à 1.10^{-4} m/s, valeur standard pour une craie moyennement fissurée.

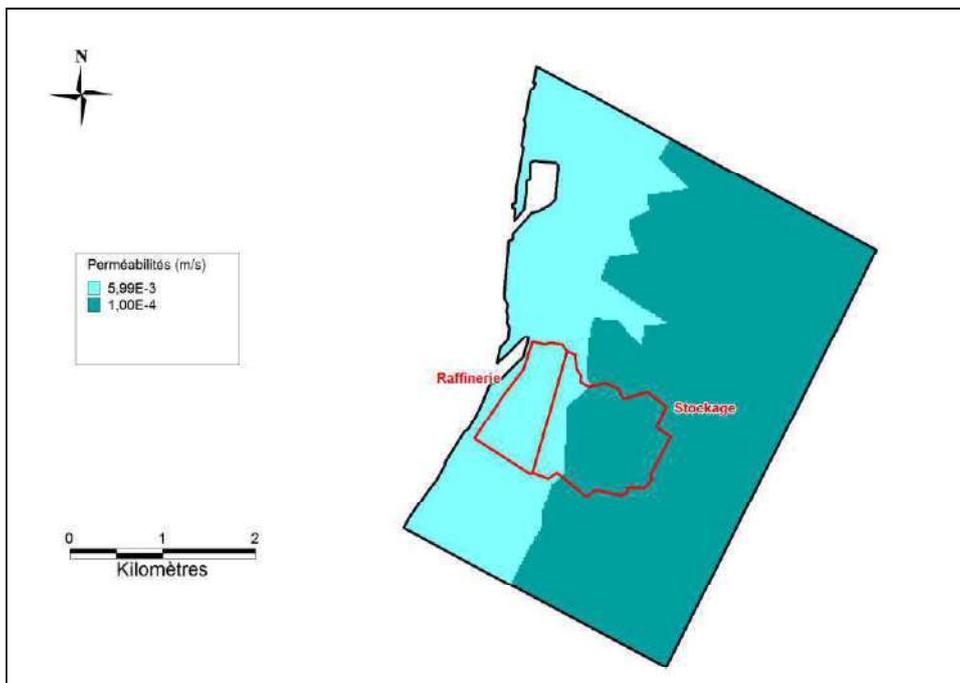


Figure 20 : Perméabilités affectées à la craie (couche 4)

3.3.3 Coefficients d'emmagasinement

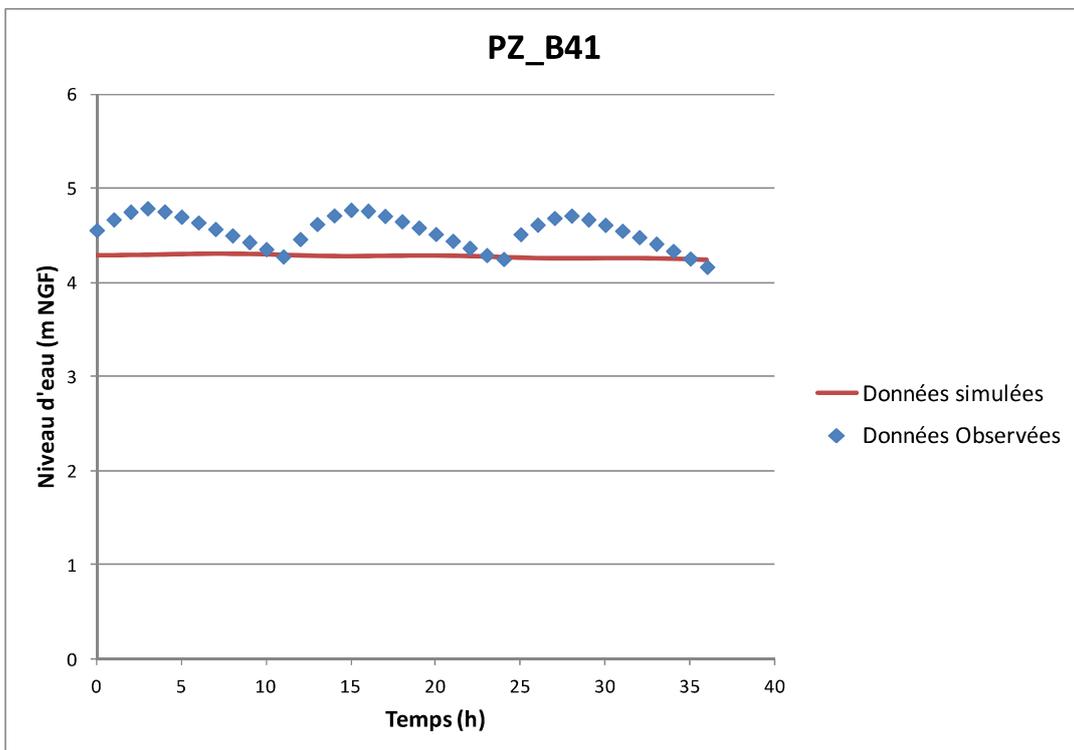
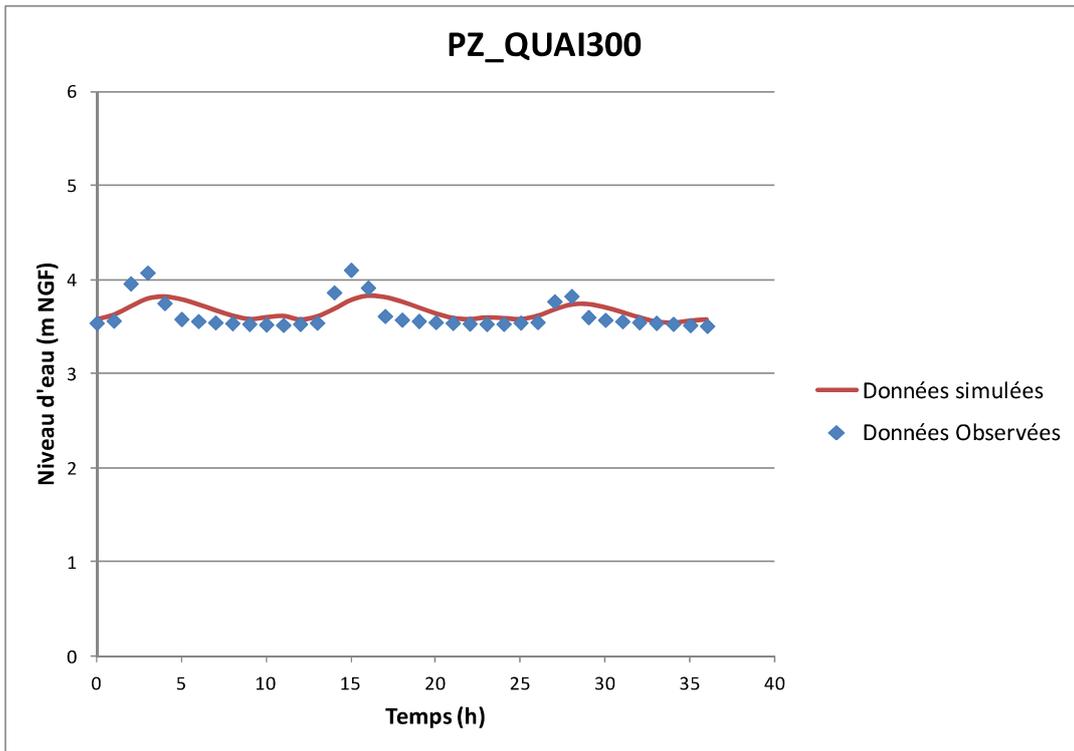
Les gammes de valeur attribuée aux zones dans les différentes couches du modèle pour le calage sont restreintes. Ainsi, les valeurs de coefficients d'emmagasinement finalement attribuées dans le modèle sont les suivantes :

1. Pour les sables limoneux le coefficient d'emmagasinement varie selon les zones de 1.10^{-3} à 5.10^{-3} ;
2. Pour les limons argileux, il varie également de 1.10^{-3} à 5.10^{-3} ;
3. Pour les alluvions anciennes, le coefficient d'emmagasinement est uniforme sur l'ensemble de la couche, égal à 1.10^{-2} ;
4. Pour la craie, il est également uniforme sur l'ensemble de la couche, égal à 1.10^{-2} .

3.3.4 Chroniques simulées/observées

Afin d'évaluer la précision des charges simulées par le modèle dans les réservoirs, une comparaison des chroniques simulées et mesurées au droit des ouvrages équipés d'enregistreurs des niveaux d'eau en continu a été réalisée. Les résultats sont présentés sur les graphiques de la Figure 21.

PETROPLUS
 Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
 Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe



PETROPLUS
 Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
 Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

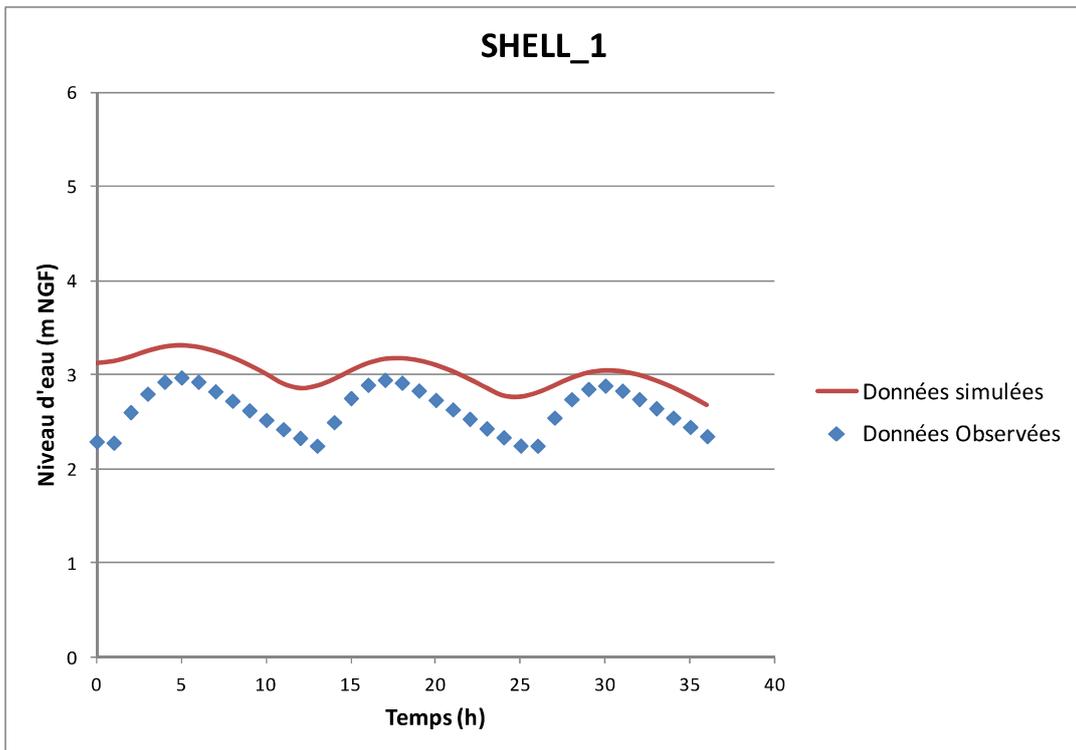
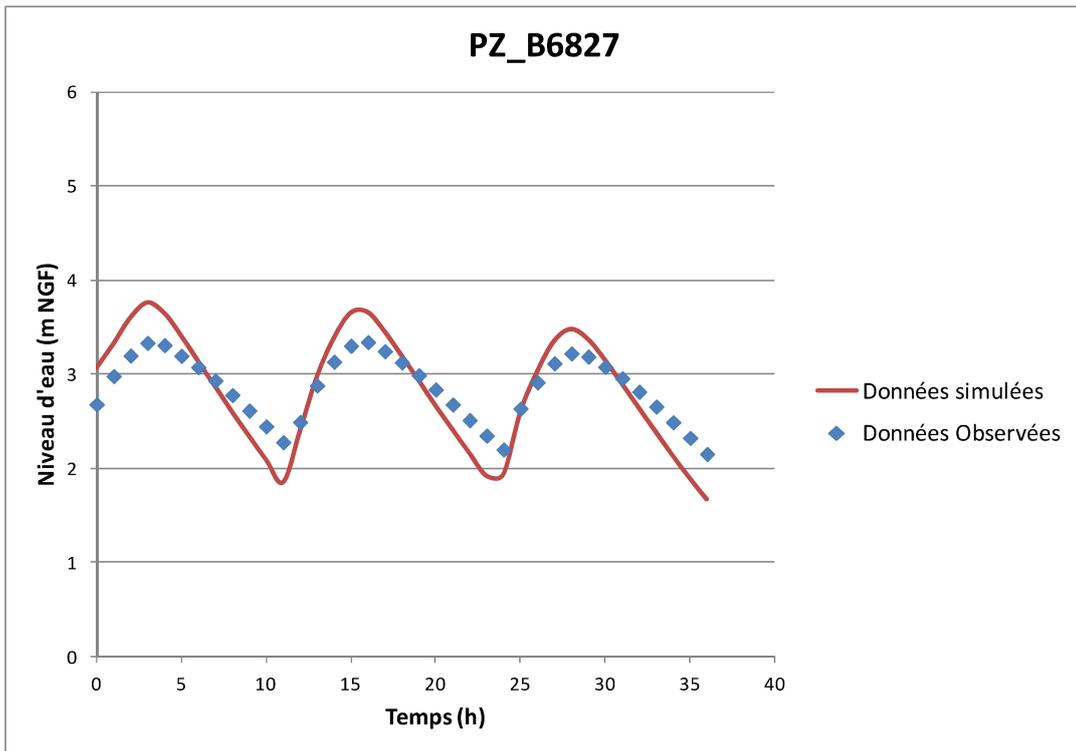


Figure 21 : Chroniques simulées au droit des ouvrages équipés d'enregistreurs en continu

PETROPLUS
Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

Ces graphiques montrent que :

- Le calage sur les chroniques observées au droit de Pz Quai 300 dans les alluvions modernes est globalement satisfaisant ;
- De même le calage sur les chroniques observées au droit de Pz B6827 dans les alluvions anciennes est satisfaisant ;
- Le calage sur les chroniques observées au droit de Pz B41 permet de recréer le niveau de la nappe dans le piézomètre. Néanmoins les variations du niveau d'eau liée aux marées de Seine observée dans cet ouvrage ne sont pas simulées par le modèle ;
- Le calage sur les chroniques observées au droit de SHELL 1 permet de simuler l'amplitude et la fréquence de la variation du niveau d'eau. Néanmoins le niveau simulé au droit de SHELL 1 reste supérieur au niveau observé, d'environ 50 cm. Comme expliqué précédemment, les niveaux observés dans SHELL 1 utilisés pour ce calage ne sont pas synchrones avec les niveaux de Seine observés utilisés pour définir les charges imposées dans la simulation. Cet écart se retrouve donc dans les charges simulées dans la craie au droit de SHELL 1.

Enfin, le calage en régime d'hydraulique transitoire est globalement satisfaisant et permet de restituer l'influence des marées de Seine dans les variations des niveaux des eaux souterraines du site.

En termes d'analyse statistique, l'erreur quadratique moyenne normée par la variance des données observées sur les 4 ouvrages utilisés pour le calage est de 15%⁸, ce qui est moyen. Lorsque cette valeur tend vers 0, cela correspond à un ajustement parfait des valeurs simulées par rapport aux valeurs observées.

Remarque : un nombre supérieur de chroniques piézométriques des différentes masses d'eaux souterraines ainsi qu'une durée d'observation plus longue des niveaux d'eau au droit du site, synchrones avec les évolutions du niveau de Seine, permettrait d'optimiser ce calage et la robustesse du modèle.

⁸Rapport de l'écart-type au carré des résidus (données observées – données simulées) par l'écart-type au carré de l'échantillon de données observées utilisées

3.4 Exploitation du modèle hydrodynamique

3.4.1 Echanges d'eau

Les tableaux suivants présentent les échanges d'eau dans le modèle à deux situations différentes de niveau de Seine :

- Une situation de basses eaux (marée basse) : la charge imposée en Seine est de 1,262 m NGF (cf. Tableau 6) ;
- Une situation de hautes eaux (marée haute) : la charge imposée en Seine est de 4,129 m NGF (cf. Tableau 7) ;

Le Tableau 6 montre que lorsque la Seine est en basses eaux, la Seine draine l'ensemble des nappes d'eau contenues dans les couches du modèle. Les flux d'eau arrivant en Seine proviennent quasi-exclusivement des alluvions anciennes (couche 3) et de la craie (couche 4). Globalement, sur l'ensemble du modèle, on peut voir également des échanges d'eau ascendants entre la craie et les alluvions anciennes, indiquant que localement dans le modèle, la nappe de la craie est en charge sous les alluvions anciennes. Toutefois ce flux ascendant est faible par rapport au flux descendant entre les alluvions anciennes et la craie.

Tableau 6 : Flux d'eau dans le modèle (m³/h) – la Seine est en situation de basses eaux – temps = 11 h

		Sables limoneux (couche 1)	Limons argileux (couche 2)	Alluvions anciennes (couche 3)	Craie (couche 4)
Infiltration		85.97	0	184.62	122.83
Débit imposé (prélèvements)		0	0	0	-450
Stockage / Déstockage		-174.73	-647.82	-2 254.79	-10 710.00
Echanges charges imposées	Entrant	0	0	0	0
	Sortant	-6.47	-12.47	-2388.89	-11 320.00
	Total	-6.47	-12.47	-2 388.89	-11 320.00
Echanges couche supérieure	Provenant de la couche supérieure	0	254.24	889.58	1 234.55
	Remontant vers la couche supérieure	0	0	0	-294.44
	Total	0	254.24	889.58	940.11
Echanges couche inférieure	Remontant de la couche inférieure	0	0	294.44	0
	Sortant vers la couche inférieure	-245.24	-889.58	-1234.55	0
	Total	-245.24	-889.58	-940.11	0
BILAN		0	0	0	0

PETROPLUS
Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

Le Tableau 7 montre que lorsque la Seine est en hautes eaux, la Seine alimente l'ensemble des nappes d'eau contenues dans les couches du modèle. Les flux d'eau provenant de la Seine vont quasi-exclusivement dans les alluvions anciennes (couche 3) et dans la craie (couche 4). Au contraire de la situation de basses eaux, sur l'ensemble du modèle, des échanges d'eau ascendants ont lieu entre l'ensemble des couches. Les flux ascendants entre la craie et les alluvions anciennes deviennent majoritaires devant les flux descendants. La craie est donc globalement en charge sous l'ensemble des alluvions modernes.

L'étude de ces flux globaux sur l'ensemble du modèle ne traduit pas les échanges locaux entre les couches. Ainsi, sur le secteur de SHELL 1, que ce soit en situation de hautes eaux ou de basses eaux de la Seine, les échanges d'eau entre les sables limoneux des alluvions modernes (couche 1) et la Seine se font toujours au profit de cette dernière. La nappe d'eau contenue dans les sables limoneux est donc perchée au dessus de la Seine, comme cela a été observé dans les piézomètres du secteur captant cette nappe.

Tableau 7 : Flux d'eau dans le modèle (m³/h) – la Seine est en situation de hautes eaux– temps = 15 h

		Sables limoneux (couche 1)	Limons argileux (couche 2)	Alluvions anciennes (couche 3)	Craie (couche 4)
Infiltration		85.97	0	184.62	122.83
Débit imposé (prélèvements)		0	0	0	-450
Stockage / Déstockage		56.96	509.94	2 318.81	9 327.60
Apports limites modèle	Entrant	39.19	10.54	2128.75	10 090.00
	Sortant	0	0	0	0
	Total	39.19	10.54	2 128.75	10 090.00
Echanges couche supérieure	Provenant de la couche supérieure	0	82.91	24.24	336.90
	Remontant vers la couche supérieure	0	-14.70	-455.42	-773.53
	Total	0	68.21	-431.19	-436.63
Echanges couche inférieure	Remontant de la couche inférieure	14.70	455.42	773.53	0
	Sortant vers la couche inférieure	-82.91	-24.24	-336.90	0
	Total	-68.21	431.19	436.63	0
BILAN		0	0	0	0

PETROPLUS
 Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
 Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

3.4.2 Charges piézométriques dans la nappe de la craie – échanges avec la Seine

Les figures suivantes montrent les isopèzes simulées de la nappe de la craie à plusieurs niveaux de la Seine sur un cycle de marée :

- La Seine est en situation de basses eaux : la Seine a une charge imposée de 1,27 m NGF (cf. Figure 22) ;
- La Seine est en situation de montée : la Seine a une charge imposée de 3,43 m NGF (cf. Figure 23) ;
- La Seine est en situation de hautes eaux : la Seine a une charge imposée de 4,13 m NGF (cf. Figure 24).

Ces figures montrent l'inversion de la direction d'écoulement de la nappe sous le site lors de la montée du niveau de Seine. De manière générale, le gradient hydraulique de la nappe est faible sous le site : environ 0,3% en situation de basses eaux lorsque la Seine draine la nappe de la craie sous le site. En situation de « moyennes eaux », le gradient hydraulique de la nappe de la craie est très faible sous la raffinerie. On peut voir sur la Figure 24 que, en situation de hautes eaux lorsque la Seine alimente la nappe sous la raffinerie, se forme une ligne de drainage des écoulements souterrains au niveau de la limite raffinerie / stockage en direction de SHELL 6 : cette ligne draine les eaux souterraines provenant de la raffinerie et les eaux souterraines provenant des coteaux sous la zone de stockage du site. Dans le secteur de SHELL 1 au sud de la raffinerie, le gradient hydraulique est très faible.

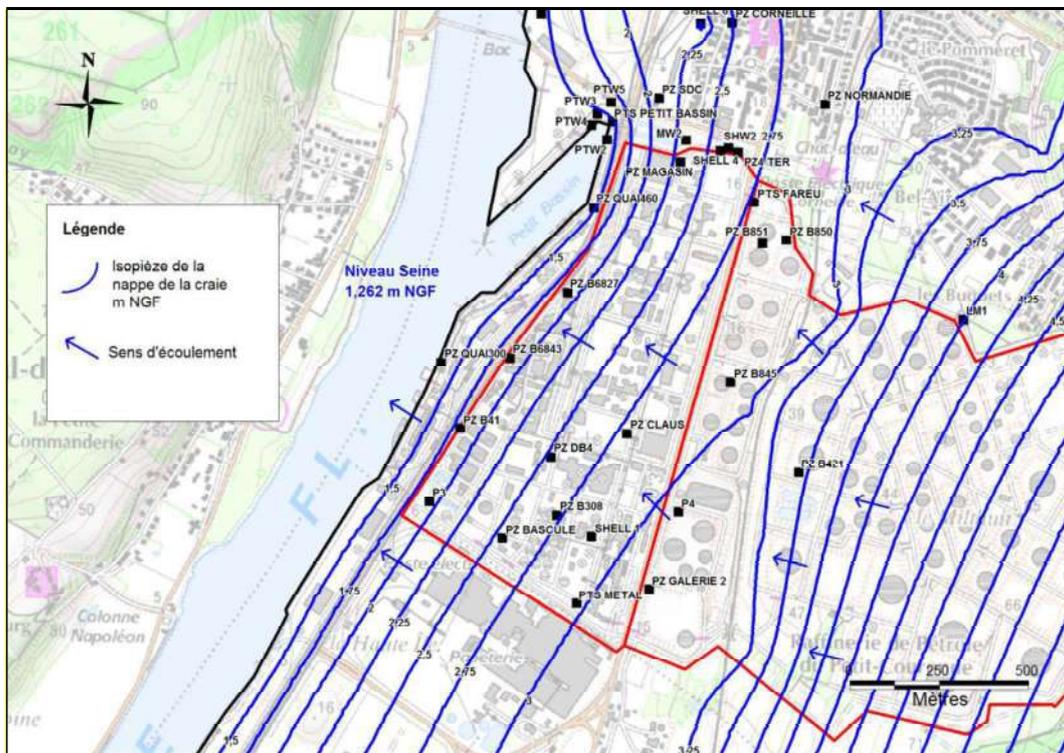


Figure 22 : Isopièzes simulées de la nappe de la craie – temps = 11h

PETROPLUS
 Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
 Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

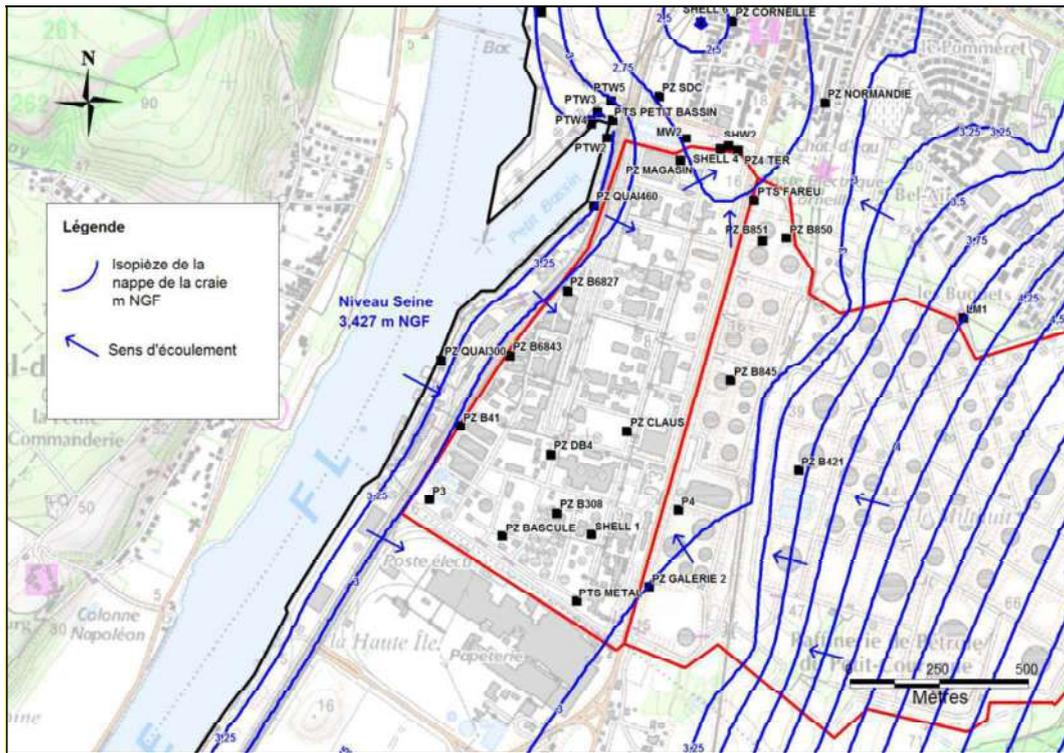


Figure 23 : Isopièzes simulées de la nappe de la craie – temps = 13h

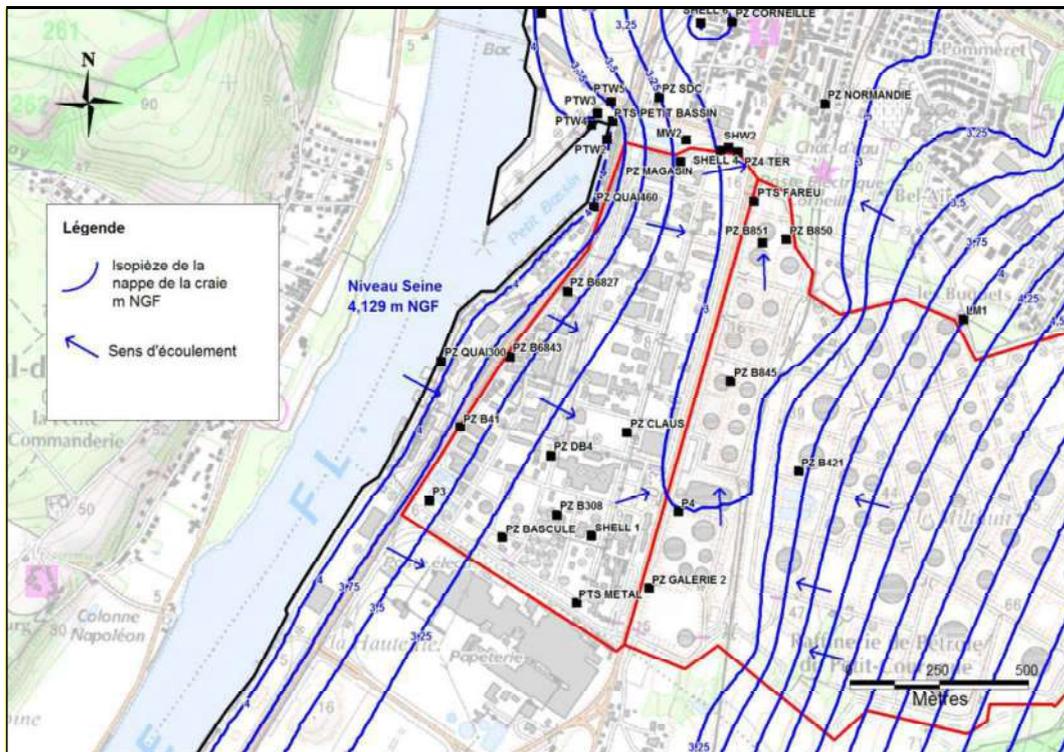


Figure 24 : Isopièzes simulées de la nappe de la craie – temps = 15h

4 Calcul des concentrations suite à l'arrêt de SHELL1

Les pollutions considérées pour le transport en nappe concernent les hydrocarbures. Dans les simulations présentées ci-après, le polluant pris en compte correspond à la classe d'hydrocarbures d'indice C5-C10, dont les concentrations mesurées en nappe sont les plus élevées. Mis à part des mesures ponctuelles au droit de certains piézomètres aucune chronique n'est disponible concernant l'historique de la pollution. Enfin, les problèmes liés à la phase flottante de la pollution sont très complexes à simuler, ils ne seront pas pris en compte.

4.1 Hypothèses utilisées

4.1.1 Processus gouvernant la migration de la pollution en nappe pris en compte

Le transport d'un élément dissous en nappe est principalement contrôlé par les processus suivants :

- La convection, liée au déplacement de l'eau dans le milieu poreux. La vitesse de migration (u), encore appelée vitesse porale, est donnée par la formule $u = [K.i] / \omega$, avec K la perméabilité du milieu, i le gradient hydraulique et ω la porosité cinématique ;
- la dispersion hydrodynamique : ce phénomène est lié à la grande variabilité des cheminements possibles du soluté à travers les pores du milieu poreux, tant du point de vue de leur longueur que de leur direction autour de la trajectoire « moyenne ». Il est caractérisé par deux grandeurs : la dispersivité longitudinale (α_L) dans le sens de l'écoulement et la dispersivité transversale (α_T) dans un plan perpendiculaire aux écoulements, paramètres intrinsèques au milieu poreux ;
- La diffusion moléculaire est due au mouvement moléculaire. Lorsqu'il existe un gradient de concentration dans un fluide, ici l'eau, celui-ci provoque la migration du produit dissous des zones où la concentration est la plus élevée vers les zones où la concentration est la plus faible. Ce processus dépend du coefficient de diffusion moléculaire du polluant considéré (d), égal au produit du coefficient de diffusion dans l'eau pure (D_0) par la tortuosité du milieu poreux (τ) ;
- A ces principaux processus, en fonction des propriétés de fixation du polluant considéré sur la matrice solide, s'ajoutent des phénomènes complexes d'adsorption-désorption qui retardent la migration des éléments dissous par rapport à celle de l'eau souterraine. On montre que lorsque les phénomènes d'adsorption sont linéaires, réversibles et instantanés, la vitesse apparente de déplacement de l'élément dissous est inférieure à celle de l'eau. Le rapport R entre la vitesse réelle de l'eau et la vitesse apparente de déplacement de l'élément dissous est appelé facteur de retard. Dans ces conditions, la vitesse de migration u de l'élément est donnée par la formule $u = [K.i] / [\omega.R]$ où R est le facteur de retard.

PETROPLUS
 Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
 Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

4.1.2 Zones sources de pollution

Sans connaissance de l'historique (suivi qualitatif) de la pollution aux hydrocarbures, l'hypothèse réalisée pour la prise en compte des sources de pollution est la suivante : sous les zones sources d'hydrocarbures, positionnées aux endroits les plus probables de zones potentielles identifiées sur la Figure 14, il existe un stock de polluants dans la zone non saturée suffisamment important pour qu'on puisse prendre l'hypothèse qu'il existe des concentrations « permanentes » dans les sables limoneux des alluvions modernes (couche 1).

Ceci constitue donc une hypothèse pénalisante en termes de concentrations attendues en nappe en bordure de Seine.

Après plusieurs ajustements successifs, sur la base des zones sources potentielles présentées en Figure 14, les zones sources finalement utilisées dans les simulations sont présentées sur la Figure 25. Ces zones, mis à part Z4, sont placées autour des piézomètres au droit desquels des concentrations importantes en hydrocarbures indice C5-C10 ont été observées. Les concentrations suivantes sont imposées de manière permanente dans le modèle :

1. Z1 : 1 200 µg/l dans les sables limoneux des alluvions modernes (couche 1) ;
2. Z2 : 1 200 µg/l dans la craie (couche 4) ;
3. Z3 : 1 600 µg/l dans la craie (couche 4) ;
4. Z4 : 4 500 µg/l dans les alluvions anciennes (couche 3).

Les concentrations mesurées ont été appliquées aux couches les plus perméables en cas de doute (craie, alluvions anciennes), ce qui est pénalisant.

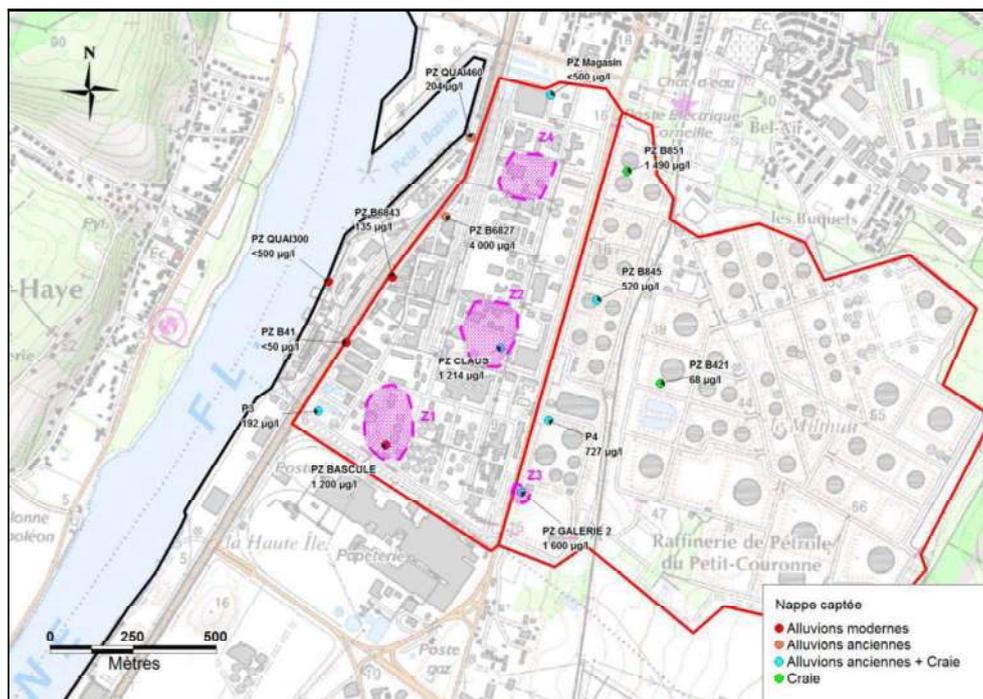


Figure 25 : Zones sources de pollution utilisées pour les simulations en transport

PETROPLUS
Raffinerie de PETIT-COURONNE (76)
Impact de l'arrêt du puits SHELL1 sur les pollutions en nappe

4.1.3 Propriétés du polluant considéré

► Coefficient de diffusion moléculaire

Sur la base de données bibliographiques⁹, le coefficient de diffusion moléculaire des hydrocarbures indice C5-C10 a été pris égal à 1.10^{-9} m²/s.

► Facteur retard

Le facteur de retard R de la phase dissoute des hydrocarbures indice C5-C10 sur les formations modélisées n'est pas connu. Dans le cas d'une adsorption linéaire, ce facteur dépend du coefficient de partage sol-eau K_d , produit des deux paramètres suivants :

- La fraction organique du sol (foc) des formations modélisées ;
- Le coefficient de partage eau – carbone (K_{oc}) du polluant qui traduit l'aptitude de la substance à être adsorbée ou désorbée sur la matière organique.

Concernant les valeurs de K_{oc} , la bibliographie¹⁰ précise que le K_{oc} des composants aliphatiques et aromatiques des hydrocarbures indice C5-C10 est compris entre 790 mg/kg et 32 000 mg/kg_{oc}.

Concernant la foc des couches modélisées, une valeur de 1.10^{-3} est prise sur la base de données bibliographiques⁹.

Sur la base de la formule du facteur de retard, deux simulations sont donc réalisées correspondant aux valeurs minimale et maximale de K_{oc} des hydrocarbures C5-C10 données par la littérature :

1. Une simulation avec un facteur retard de 10 : cela signifie une faible interaction du composé avec la matrice poreuse (le polluant est considéré comme un traceur parfait). **C'est donc une hypothèse pénalisante en termes de concentrations attendues en aval de la zone impactée ;**
2. Une simulation avec un facteur retard de 350.

⁹ Source : INERIS - Projet TRANSPOL – Programme 2000 – Volet 2- Pollution souterraine : paramètres et paramétrage des modèles en écoulement et en transport de polluants

¹⁰ Source : INERIS – Rapport d'étude N°DRC-11-115732-09274C – Réutilisation des terres excavées sur des projets d'aménagement : élaboration de seuils vis-à-vis des risques sanitaires

4.1.4 Paramètres hydrodispersifs des réservoirs aquifères

► Dispersivité

La dispersivité longitudinale α_L à prendre en compte dans le modèle est fonction de la distance L entre la (ou les) source et la (ou les) cibles en prenant la distance la plus courte. Sur le site la distance source – cible la plus courte est celle séparant la zone source Z4 de la Seine, soit L = 250 m. L'approximation générale de α_L d'après la bibliographie est L/10 soit 25 m dans notre cas.

Les coefficients de dispersivité pris en compte dans le modèle pour les sables limoneux au sommet des alluvions modernes ainsi que pour les alluvions anciennes et la craie sont donc les suivants :

- une dispersivité longitudinale α_L de 25 m,
- une dispersivité transversale α_T égale au $1/10^{\text{ème}}$ de α_L , soit 2,5 m,

Pour limiter les phénomènes inévitables de dispersion numérique dans les résultats obtenus, il est nécessaire de respecter le nombre de Péclet : $Pe = dx / \alpha_L$, où dx est la taille d'une maille. Les résultats des simulations seront d'autant meilleurs que le nombre de Péclet sera petit (discrétisation spatiale fine). La taille des mailles du modèle étant de 20 m, le nombre de Péclet est toujours inférieur à 1.

Remarque : notons qu'il ne faudrait pas penser qu'à partir du moment où le critère $Pe < 1$ est respecté, les résultats obtenus sont parfaits.

Pour les limons argileux contenus dans les alluvions modernes (couche 2), les transferts hydrauliques sont quasi verticaux en direction des formations perméables sous-jacentes (alluvions anciennes et craie). Les distances en jeu correspondent donc grossièrement à l'épaisseur de cette couche (7 m). On considère donc pour les paramètres α_L et α_T des valeurs nettement plus faibles, fixées respectivement à 0,1 et 0,01 m.

Les valeurs définitives des coefficients de dispersion ont été retenues suite au calage du modèle par itérations successives, tout en gardant des valeurs cohérentes par rapport aux ordres de grandeurs de la réalité physique de la zone modélisée.

► Porosité cinématique

Comme présenté précédemment, en l'absence de résultats de traçage, la porosité cinématique des formations modélisées n'est pas connue. Ainsi la porosité cinématique des couches sera donc considérée assimilable à la porosité efficace qui, en nappe libre, est équivalente au coefficient d'emménagement. Au contraire des coefficients d'emménagement dont les valeurs affectées aux couches du modèle ont été spatialisées suite au calage hydrodynamique, les valeurs de porosité cinématique retenues ont été affectées de manière uniforme par couche (cf. paragraphe 2.5.2 Coefficients d'emménagement et porosité des aquifères) :

1. Sables limoneux : 1.10^{-3} ;
2. Limons argileux : 1.10^{-3} ;
3. Alluvions anciennes : 1.10^{-2} ;
4. Craie : 1.10^{-2} .