

Figure 4.15

Schéma de principe du pompage-écrémage d'huile libre au toit d'une nappe phréatique.

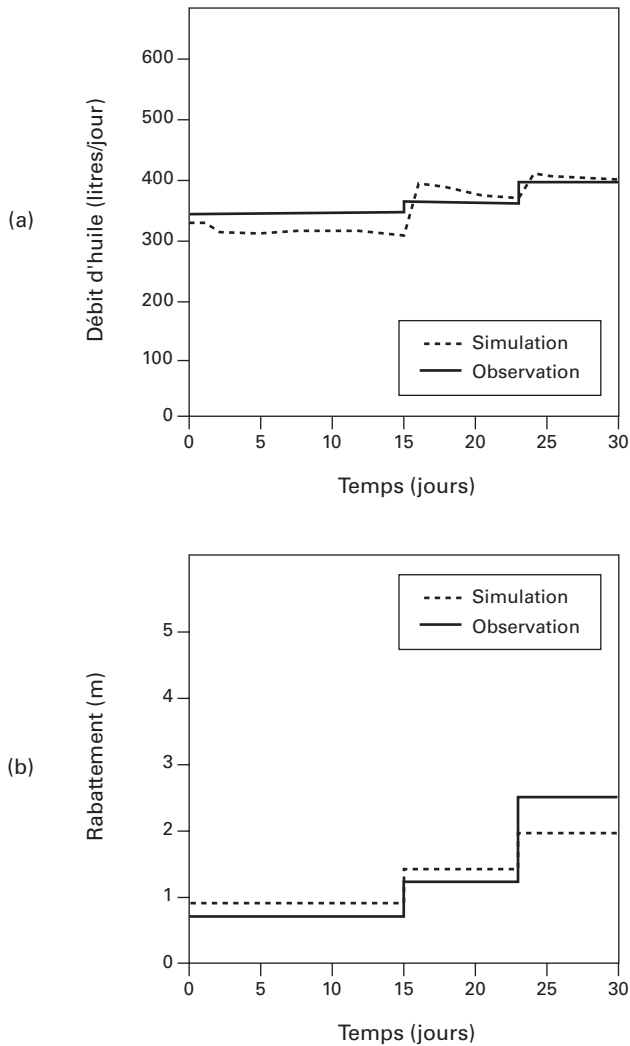
au cours du temps, on peut, si la durée de l'opération est imposée et si on accepte une certaine amplification du phénomène de traînée verticale, augmenter graduellement le débit de pompage d'eau pour maintenir approximativement le même débit de récupération d'huile, comme le montre la figure 4.16 relative au traitement d'un site pollué par une essence pour lequel l'utilisation du modèle triphasique SIMUSCOPP a permis de simuler le pompage-écumage et de régler le débit de pompage [Le Thiez *et al.*, 1996a].

Lorsque le niveau de la nappe phréatique est peu profond, c'est-à-dire un à quelques mètres, la récupération de l'huile mobile peut être faite dans des tranchées ouvertes creusées perpendiculairement au flux de la nappe et dans lesquelles l'eau est pompée.

Dans tous les cas, il faut retenir que le pompage-écumage ne permet de récupérer que la fraction mobile de la phase huileuse qui dépasse rarement 30 à 40 % de l'huile totale. Pour mémoire, la teneur moyenne en huile résiduelle piégée est de l'ordre de 15 litres/m<sup>3</sup> dans la zone insaturée et 30 litres/m<sup>3</sup> dans la zone saturée au toit de la nappe, dans le cas d'un gazole dans un sol constitué par un sable moyen. Par ailleurs, cette technique ne s'applique pratiquement pas à des huiles très visqueuses comme des fiouls lourds et des goudrons de houille, ces derniers pouvant en outre avoir une densité supérieure à 1.

#### b. L'extraction en phase gazeuse

Elle consiste à **aspérer les hydrocarbures volatils** de la phase huileuse résiduelle, ainsi que les aromatiques légers dissous dans l'eau résiduelle de la zone insaturée, en déplaçant continuellement l'équilibre liquide-gaz dans le sol par mise en écoulement de l'air dans la zone insaturée du sol (aération forcée). Le sol est mis en dépression autour d'un ou plusieurs puits



**Figure 4.16**

Bilan d'une opération de pompage d'un produit pétrolier au toit d'une nappe phréatique : produit récupéré au cours du temps (a) en faisant varier la hauteur de rabattement (b) et simulation de l'opération au moyen du modèle SIMUS-COPP. D'après [Le Thiez *et al.*, 1996a].

crépinés dans lesquels l'air est aspiré au moyen d'un extracteur hors sol. Les puits crépinés sont parfois remplacés par un ensemble de cannes d'aspiration. La réalisation de puits déviés ou de puits horizontaux peut s'avérer nécessaire lorsqu'il faut aspirer sous un bâtiment et des systèmes de drains spécialement conçus doivent être mis en œuvre lorsque la dépollu-

tion ne peut pas être achevée avant la construction d'un ouvrage, comme ce fut le cas sur le site du Stade de France à Saint Denis (voir en introduction).

Dans la variante appelée **ventilation** ou « **venting** », un puits d'aspiration central est entouré de plusieurs puits d'injection d'air sous pression implantés pour faire circuler l'air dans toute la zone contaminée (figure 4.17). Dans la variante appelée extraction sous vide ou « air vacuum extraction », plusieurs puits d'aspiration sont reliés à un extracteur capable de créer autour de chaque puits une dépression de l'ordre de 100 à 200 hPa à proximité immédiate du puits (figure 4.18). L'implantation des puits doit être effectuée en tenant compte du gradient de pression négative (par rapport à la pression atmosphérique) pour couvrir l'ensemble de la zone contaminée, avec les contraintes éventuelles de constructions de surface ou de subsurface. Ainsi, dans l'exemple cité en 2.4.4 [Le Thiez *et al.*, 1996b], la dépollution du site d'une station-service pollué par 15 m<sup>3</sup> d'un mélange d'essence vieillie et de gazole a été réalisée par extraction au moyen d'un ensemble de 16 puits mis en service cycliquement sur trois secteurs, comme le montre la figure 4.19 qui indique aussi le champ de pression simulé par le modèle SIMUSCOPP lorsque les puits 1 à 10 et le puits 16 sont en service (conductivité hydraulique du sol : 10<sup>-4</sup> m/s). Au bout de 9 mois de fonctionnement de l'extracteur à un débit de 800 m<sup>3</sup>/h, plus de 11 m<sup>3</sup> de produit ont été extraits (voir figure 2.31), constitués principalement par la totalité de la fraction légère de l'essence (C8-) et de la plus grande partie de sa fraction lourde (C9-C10) comme le montre la figure 4.20 restituant l'évolution de la composition du polluant résiduel dans le sol, la fraction gazole (C11+) n'étant pratiquement pas volatilisée. Il faut cependant remarquer que dans des condi-

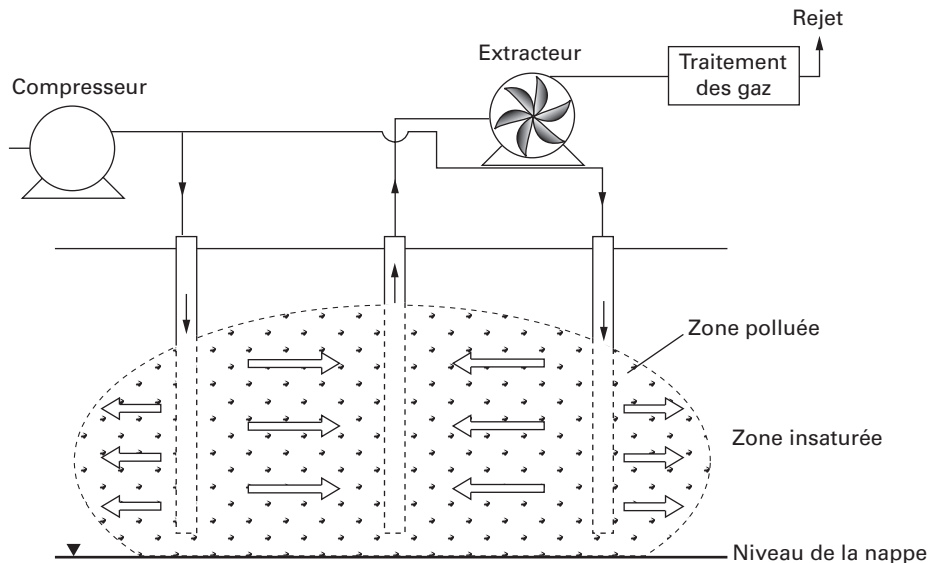


Figure 4.17

Schéma de principe de la technique d'extraction des hydrocarbures volatils dans la zone insaturée d'un sol par ventilation (« venting »).

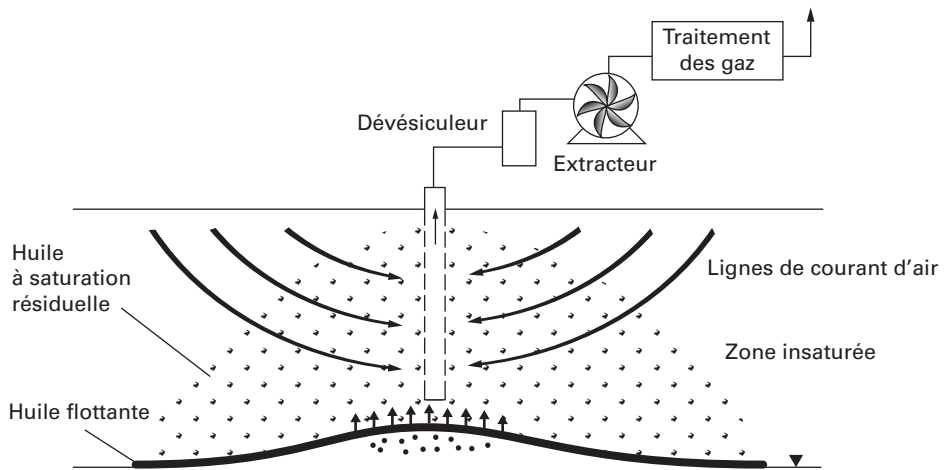


Figure 4.18

Schéma de principe de la technique d'extraction des hydrocarbures volatils dans la zone insaturée d'un sol par extraction sous-vide.

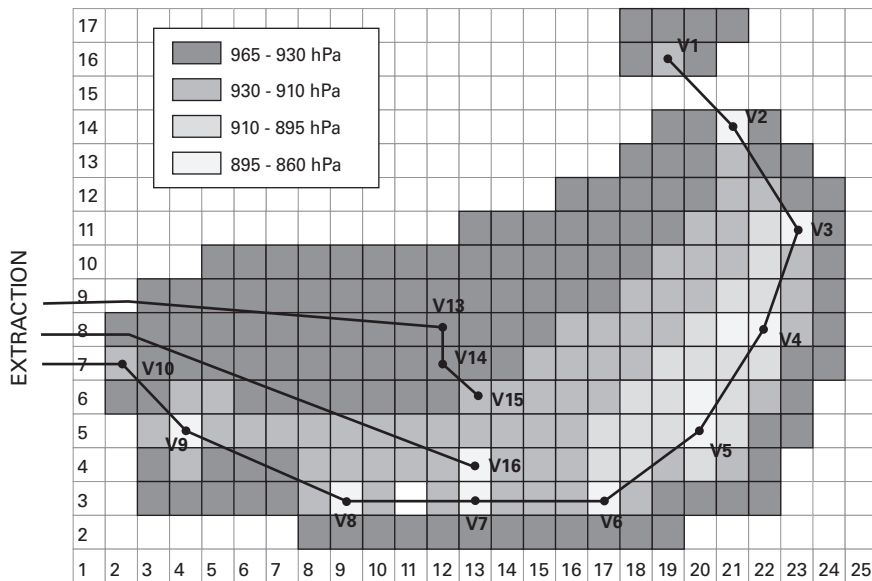
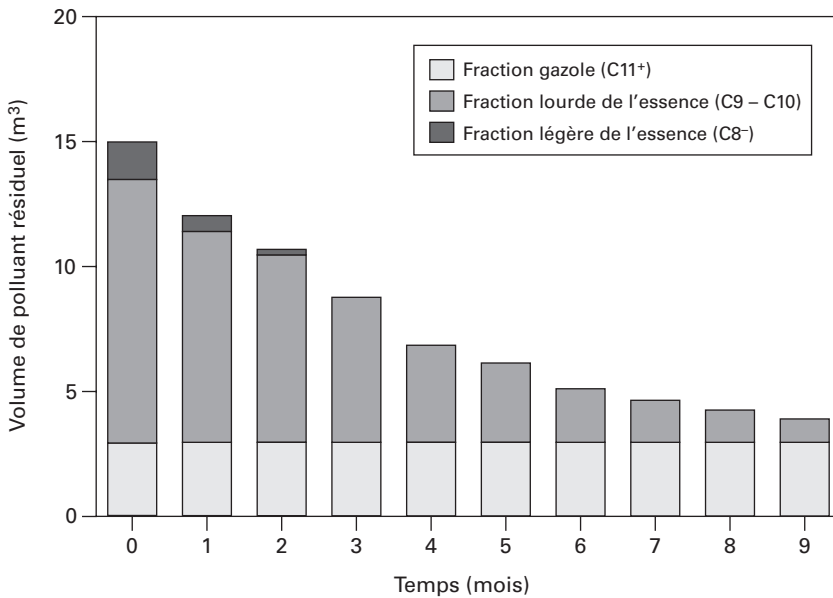


Figure 4.19

Opération de dépollution du sol d'une station-service par extraction des hydrocarbures volatils d'un mélange d'essence vieillie et de gazole : maillage de la modélisation au moyen de SIMUSCOPP (250 mailles de 2 m<sup>3</sup> en 2 couches au-dessus de la nappe et implantation des puits d'aspiration. D'après [Le Thiez *et al.*, 1996b].



**Figure 4.20**

Opération de dépollution d'une station-service par extraction des hydrocarbures d'un mélange d'essence vieillie et de gazole (implantation des puits d'aspiration sur figure 4.19) : évolution de la composition du polluant résiduel au cours du temps. D'après Le Thiez.

tions optimales au laboratoire, la volatilisation permet d'extraire des hydrocarbures un peu plus lourds, jusqu'à C13-C14 [Ducreux, résultats non publiés]. Si la simulation montre que le même résultat aurait pu être théoriquement obtenu plus rapidement en aspirant en continu dans l'ensemble des puits à un débit notablement plus élevé (1 200 m<sup>3</sup>/h), c'est la procédure qui permet d'utiliser au mieux la capacité de l'extracteur qui a été adoptée en réalité. La simulation montre aussi que la mise en œuvre de puits horizontaux aurait permis d'atteindre le même résultat plus rapidement, mais le coût notablement supérieur de l'implantation ne se justifiait pas. En revanche, sur certains sites, peu accessibles pour le forage de puits verticaux (constructions, cuves souterraines), l'implantation de puits horizontaux peut s'avérer la solution privilégiée. La simulation montre enfin que dans le cas présenté il aurait été possible, pendant la même durée, d'extraire 1 m<sup>3</sup> supplémentaire d'hydrocarbures, constitués par le résiduel d'essence et une partie de la fraction gazole, en injectant de l'air chaud à 300 °C dans 5 puits, mais avec un surcoût qui n'est pas forcément justifié par une réduction du risque de contamination de la nappe déjà fortement atténué. Cette technique de ventilation à l'air chaud, dont l'efficacité peut d'ailleurs être encore améliorée par l'injection de vapeur d'eau, ne représente réellement d'intérêt, sur le plan du bénéfice économique et environnemental net, que dans des cas extrêmes.

Dans le cas de la pollution accidentelle sur le site de Chavanay dans la vallée du Rhône en 1990 (déraillement d'un train de wagons-citernes ayant entraîné l'infiltration de plus de 250 m<sup>3</sup> d'essence dans le sol, jusqu'à la nappe phréatique), l'extraction sous vide a été mise en œuvre après pompage-écrémage de la phase surnageante et mise en place d'un piège hydraulique : après 14 mois d'aspiration dans 90 puits, l'objectif de dépollution, fixé à 10 mg d'hydrocarbures par kg de sol, était atteint [Antoine *et al.*, 1993].

En fin de compte, il faut retenir que l'extraction en phase gazeuse concerne essentiellement les hydrocarbures volatils (en pratique tous les composés dont la tension de vapeur est supérieure à environ 0,001 hPa) dans un sol suffisamment perméable (une perméabilité supérieure à 10<sup>-5</sup> m/s est généralement requise même si la technique a déjà été appliquée dans des sols moins perméables). Une relative homogénéité du sol est aussi une condition importante. En effet, dans le cas de fortes hétérogénéités de structure, la phase gazeuse en mouvement traversera préférentiellement les zones les plus perméables en n'entraînant que faiblement les composés volatils retenus dans les zones moins perméables compte tenu de la faible diffusion.

Les équipements hors sol de mise en œuvre de l'extraction en phase gazeuse comprennent principalement, sous forme d'installation fixe ou mobile, l'extracteur, le séparateur eau-gaz, l'unité de traitement des gaz et la pompe d'injection d'air le cas échéant. Le traitement des gaz extraits, qui correspond généralement à une fraction importante du coût global, peut être effectué par incinération, par oxydation catalytique, par adsorption sur charbon actif (qui doit être lui-même retraité), ou par voie biologique (biofiltre).

L'extraction sous vide est parfois réalisée dans un puits crépiné jusqu'au toit de la nappe. Une dépression de 200 à 250 hPa permet alors de coupler l'aspiration de la phase gazeuse dans la zone insaturée avec le pompage de la nappe au niveau de sa frange capillaire et de sa couche supérieure. Cette technique, appelée **extraction double**, permet de décontaminer simultanément la zone insaturée, pour autant qu'il s'agisse d'hydrocarbures volatils, et la couche supérieure de la nappe, les aromatiques dissous étant éliminés, si nécessaire, du flux d'eau pompée par l'une des techniques possibles (adsorption sur charbon actif, strippage en colonne et traitement du gaz par oxydation, oxydation directe par un mélange d'ozone et de peroxyde, oxydation catalytique ou photocatalytique). Pour éviter les difficultés qui peuvent survenir dans la séparation liquide-gaz, les puits peuvent être réalisés avec un équipement spécial permettant de séparer les flux dans le puits même.

Une autre variante consiste à **coupler l'aspiration de la phase gazeuse du sol insaturé avec le strippage de l'eau de nappe dans un puits à circulation**, donc sans remontée de flux liquide à la surface. Ce procédé, développé initialement en Allemagne sous le nom IEG-UVB [Herrling *et al.*, 1991], est basé sur une conception particulière du puits dans lequel une pompe fait circuler l'eau de la nappe au travers d'une double crépine, le strippage étant effectué par une injection d'air qui, en s'échappant crée une aspiration de la phase gazeuse de la zone insaturée (figure 4.21).

**Le strippage de la nappe (air sparging)** est effectué par injection d'air sous pression. Les bulles d'air formées remontent vers la surface de la nappe en volatilissant les hydrocarbures dissous et, le cas échéant, les hydrocarbures volatils d'une phase huileuse piégée dans la couche supérieure de la nappe. L'air chargé de polluants est extrait dans la zone insaturée

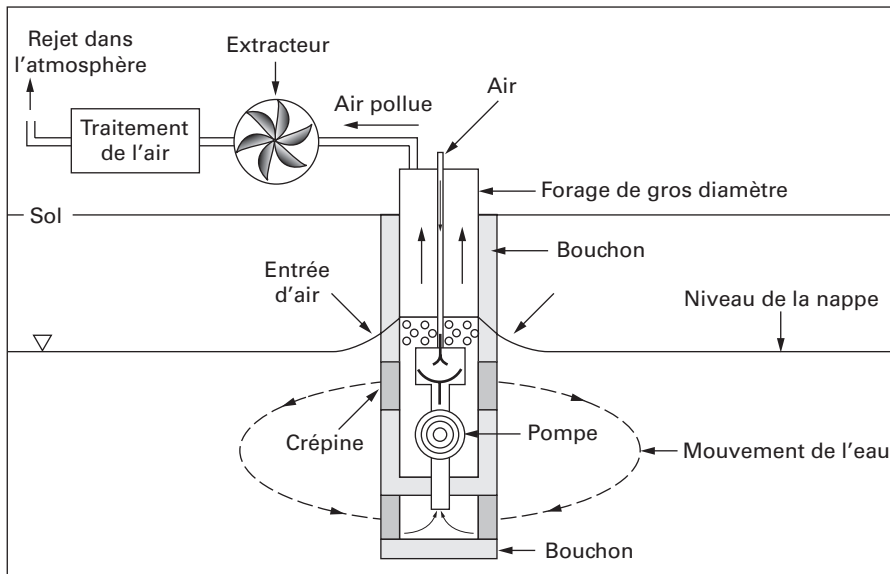


Figure 4.21

Schéma de principe du procédé IEG-UVB consistant à coupler, dans un puits à circulation forcée, l'aspiration des hydrocarbures volatils dans la phase gazeuse du sol avec le strippage des hydrocarbures dissous dans la nappe. D'après [Lecomte, 1998].

par des puits implantés en alternance avec les puits d'injection, ce qui permet d'extraire simultanément les hydrocarbures volatils piégés dans la zone insaturée (figure 4.22) si la hauteur de crépinage des puits d'extraction est adaptée. L'efficacité du *venting* associé sera cependant médiocre si les concentrations en phase gazeuse sont proches de celles correspondant à l'équilibre huile-air. Les limitations de l'efficacité du strippage *in situ* sont liées principalement aux chemins préférentiels que l'air peut emprunter et aux risques de colmatage du milieu poreux. La présence de lentilles d'argile est aussi de nature à perturber la remontée de l'air et le contact avec les polluants. Comme schématisé sur la figure 4.23, l'injection d'air dans la nappe favorisera la volatilisation-extraction ou la biodégradation *in situ* (voir paragraphe suivant) selon le débit d'air et la volatilité des hydrocarbures. Les deux processus sont souvent indissociables, comme l'ont montré des essais pilotes réalisés en Angleterre sur le site d'une ancienne usine à gaz dont l'aquifère était contaminé par des BTEX et des HAP [Shields *et al.*, 2000].

### c. Le drainage activé par tensioactifs

C'est une technique émergente qui vise à déplacer, vers un puits de pompage, une phase huileuse piégée à saturation résiduelle dans la zone insaturée du sol, dans la frange capillaire ou la couche supérieure de la nappe, en faisant circuler une solution aqueuse de tensioactifs au travers de la zone d'imprégnation. Le développement de cette technique a bénéficié des