Laboratoires et échantillonnages

LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquid)

Lars Van Passel
13-10-2015

Copyright of RSK

Contenu

Caractéristiques de LNAPL

Modèle conceptuel de LNAPL

- Distribution de LNAPL
- Fluctuations de niveau d'eau souterraine et redistribution de LNAPL
- Transport de LNAPL

Caractérisation des sites avec LNAPL

- Investigation de la distribution de LNAPL
- Investigation de la mobilité de LNAPL

Copyright of RSK

Caractéristiques de LNAPL

Copyright of RSK

Quoi?

NAPL = Non-Aqueous Phase Liquid = liquide d'une autre phase que l'eau

- LNAPL: NAPL moins dense que l'eau
- DNAPL: NAPL plus dense que l'eau

LNAPL: Produits chimiques liquides caractérisé par:

- Immiscible dans l'eau (hydrophobe)
- Densité moins que celle de l'eau
- Composition chimique complexe (en général)

LNAPLs rencontré le plus souvent:

- Carburants
- Huiles

Copyright of RSK

Solubilité

- Solubilité component ≠ solubilité réelle dans une mélange

LNAPL	Benzène	Toluène	Ethylbenzène	Xylènes
Component seul	1780	470	152	175
Essence typique	1%	10%	2%	10%
	18	47	3	18

- Components aliphatiques < Components aromatiques
- Masse moleculaire ↑ ⇒ solubilité ↓
- Alcools > oxygenates > aromates > aliphates

Copyright of RSK

Composition

Point de bouillir (carburants ↔ huiles)

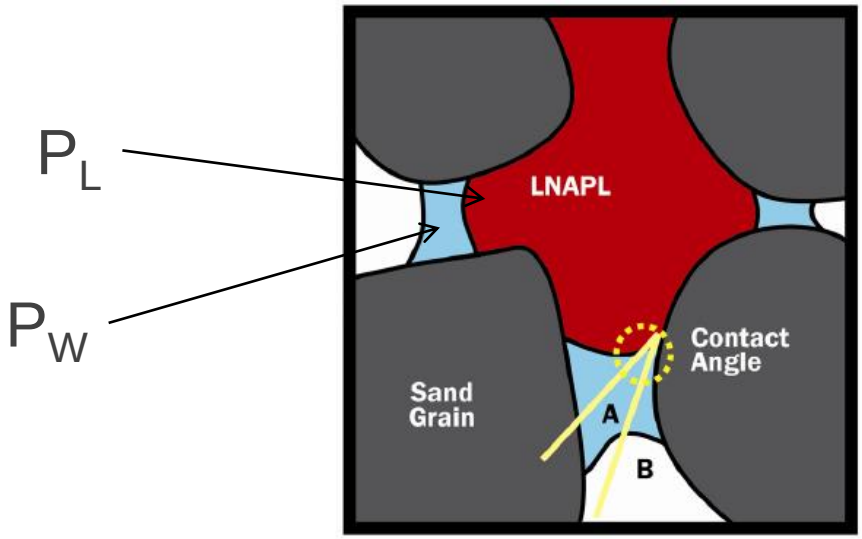
Nom de la fraction	Nombre typique d'atomes de carbone	Point de bouillir (°C)
Essence	6 – 10	100 - 150
Naphta	6 – 11	70 – 200
Kerosène (parafine)	10 – 12	150 - 200
Diesel	12 - 18	200 – 300
Huile lubrificant	18 – 25	300 – 400
Huile de fuel	20 – 27	350 – 450
Gresse et waxe	25 – 30	400 - 500
Bitumes	➢ 35	> 500

Point de bouillir ⇒ temps de retention dans un GC (analyse HCT C10-C40)

Copyright of RSK

Force de capillarité

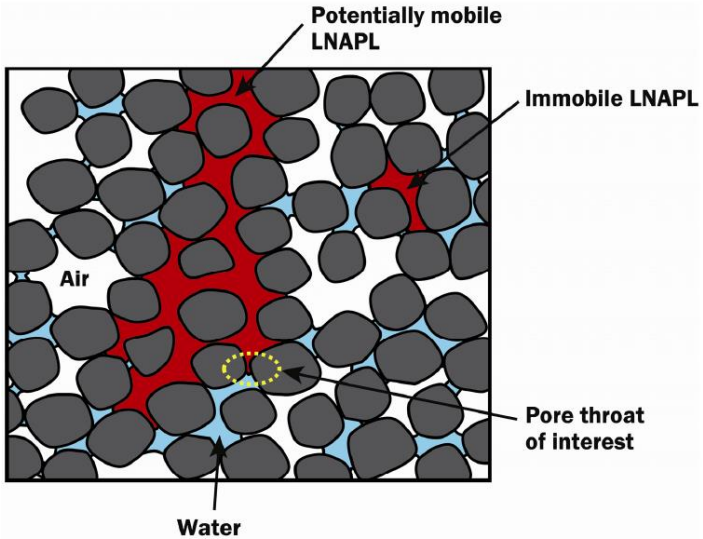
Force de capillarité : présence d'une chute de pression sur l'interface entre 2 liquides immiscibles



Pression d'entrée (= pression capillaire) pourque LNAPL entre l'eau:

$$\Delta P_{LNAPL} = P_L - P_W = \frac{2\sigma_{LW}\cos\theta}{r}$$

$$h_{LNAPL} = \frac{2\sigma_{LW}\cos\theta}{r(\rho_W - \rho_L)g}$$



Consequance:

- Eau se met en lentilles
- Air et LNAPL: dans les pores plus grand, prise par l'eau

Copyright of RSK

Force de capillarité

Influence des composants:

- Densité de LNAPL: $\rho_L \uparrow \Rightarrow h_{LNAPL} \uparrow$
- Ether oxygenates (MTBE, ETBE, TAME) et autre additives
  $\Rightarrow \sigma_{LW} \downarrow \Rightarrow h_{LNAPL} \downarrow$
- Ethanol ou autres alcools (essence bio)
  - Par exemple E85: 85% ethanol + 15% essence
  - Ethanol comparé avec essence: $\sigma_{LW} \downarrow \Rightarrow h_{LNAPL} \downarrow$
  - Alcools peuvent servir comme cosolvent
  - Plus de production des vapeurs
  - Potentielle pour methanogenese augmenté
- Changement de la composition
  - Vieillissement, pertes par vapeurs ou dissolution
    $\Rightarrow \sigma_{LW} \uparrow \Rightarrow h_{LNAPL} \uparrow$

Copyright of RSK

Perceptions générales concernant LNAPL

Des perceptions typiques concernant LNAPL:

- LNAPL entre les pores facile, comme l'eau
- Tout LNAPL peut être récupéré
- Tous les pores dans une corps de LNAPL sont remplis avec LNAPL
- LNAPL se trouve au dessus de l'eau et ne penètre pas dans l'eau (comme une crêpe)
- L'épaisseur dans le Pz est egale l'épaisseur réelle avec un facteur de 2, 4, …
- L'épaisseur dans le Pz égale toujours l'épaisseur du formation
- Produit pure dans le Pz veut dire que c'est mobile et en migration
- Le corps de LNAPL bouge a cause du mouvement de l'eau souterraine
- Les corps de LNAPL bouge très longtemps

Copyright of RSK

Modèle conceptuel de LNAPL

Distribution de LNAPL

Copyright of RSK

Perceptions générales concernant LNAPL

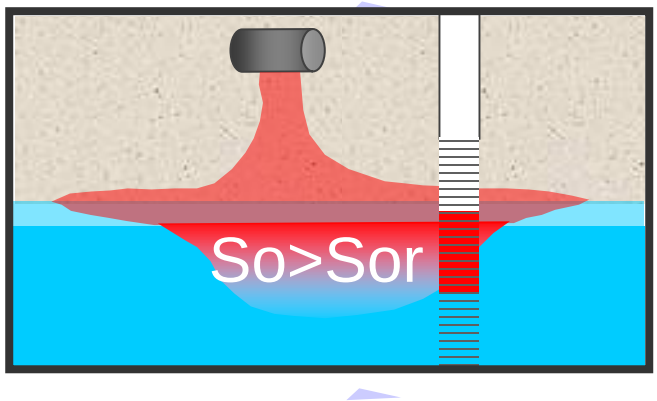
- LNAPL entre les pores facile, comme l'eau
- Tout LNAPL peut être récupéré
- Tous les pores dans une corps de LNAPL sont remplis avec LNAPL
- LNAPL se trouve au dessus de l'eau et ne penètre pas dans l'eau (comme une crêpe)
- L'épaisseur dans le Pz est egale l'épaisseur réelle avec un facteur de 2, 4, …
- L'épaisseur dans le Pz égale toujours l'épaisseur du formation
- Produit pure dans le Pz veut dire que c'est mobile et en migration
- Le corps de LNAPL bouge a cause du mouvement de l'eau souterraine
- Les corps de LNAPL bouge très longtemps

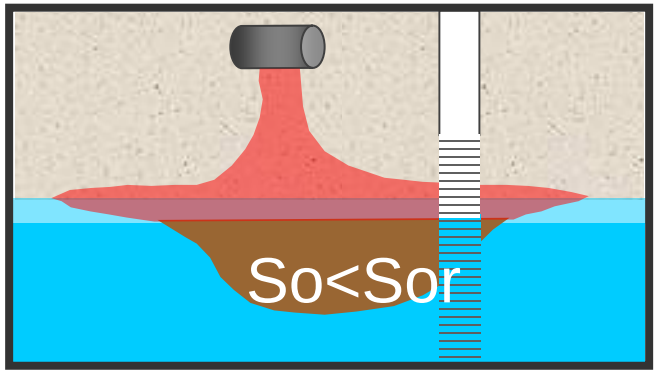
Copyright of RSK

Saturation

Saturation ↔ Saturation residuelle

- Saturation de LNAPL (So)
  - fraction de l'espace des pores remplies par LNAPL
- Saturation residuelle de LNAPL (Sor)
  - Fraction de l'espace des pores remplies par LNAPL et qui ne peut pas être mobilisée par mettre un gradient

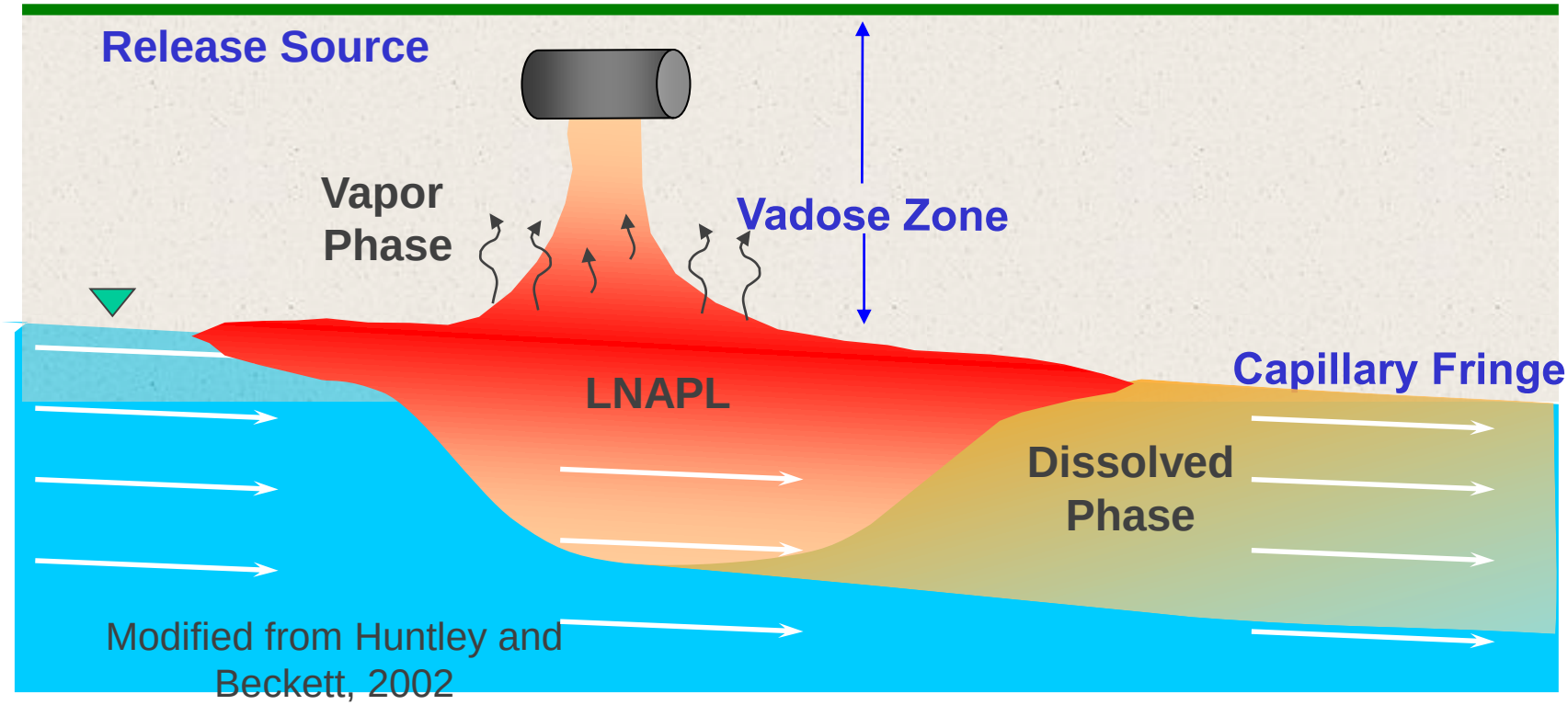




Copyright of RSK

CSM simplifié – citerne qui fuit

- LNAPL doit déplacer les fluides existantes (l'air, de l'eau) pour entrer dans une pore
- Il est plus facile pour LNAPL de déplacer l'air que l'eau
- LNAPL entre dans une pore mouillé ⇔ la pression d'entrée est surmontée



Copyright of RSK

Résistance des pores

Pression d'entrée (exprimée en hauteur) pourque LNAPL entre des pores rempli avec l'eau:

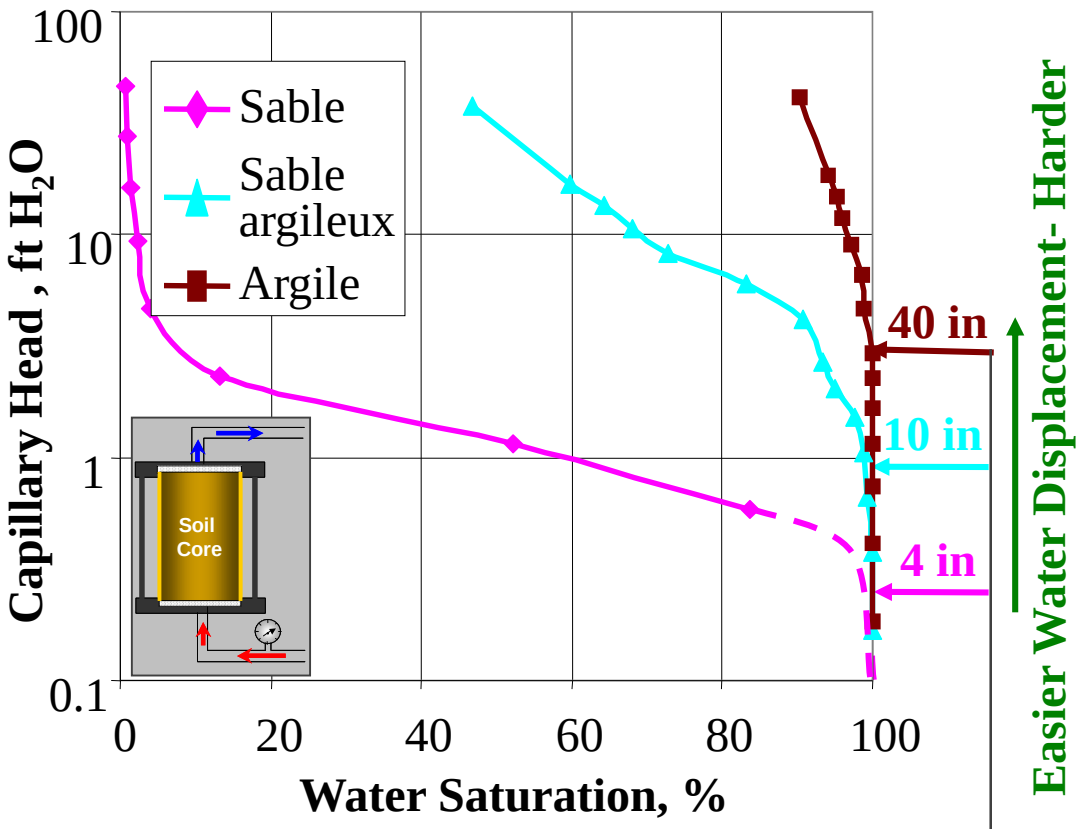
$$h_{LNAPL} = \frac{2\sigma_{LW}\cos\theta}{r(\rho_W - \rho_L)g}$$

Paramètre	Trend paramètre	Resultat h_{LNAPL}	Potentiel de LNAPL pour entrer une pore rempli
Tension interfaciale eau/LNAPL (σ_{LW})	↑	↑	↓
Taille de la pore (r)	↑	↓	↑
Densité du LNAPL (ρ_L)	↑	↑	↓

Point important: h_{LNAPL} plus haut veux dire que c'est plus difficile pour LNAPL de déplacer l'eau des pores

Copyright of RSK

Curves de pression capillaire (moisture retention curves)



Hauteur de déplacement pour une fluide
= montée capillaire dans un système eau-air = h_{wa}

Argile contient l'eau avec plus de force

- Difficile pour LNAPL pour entrer les pores remplis avec l'eau

Sable contient l'eau avec moins de force

- Plus facile pour LNAPL pour déplacer l'eau dans le pore

Point important: c'est difficile pour LNAPL pour déplacer l'eau dans les pores des sols fines

Copyright of RSK

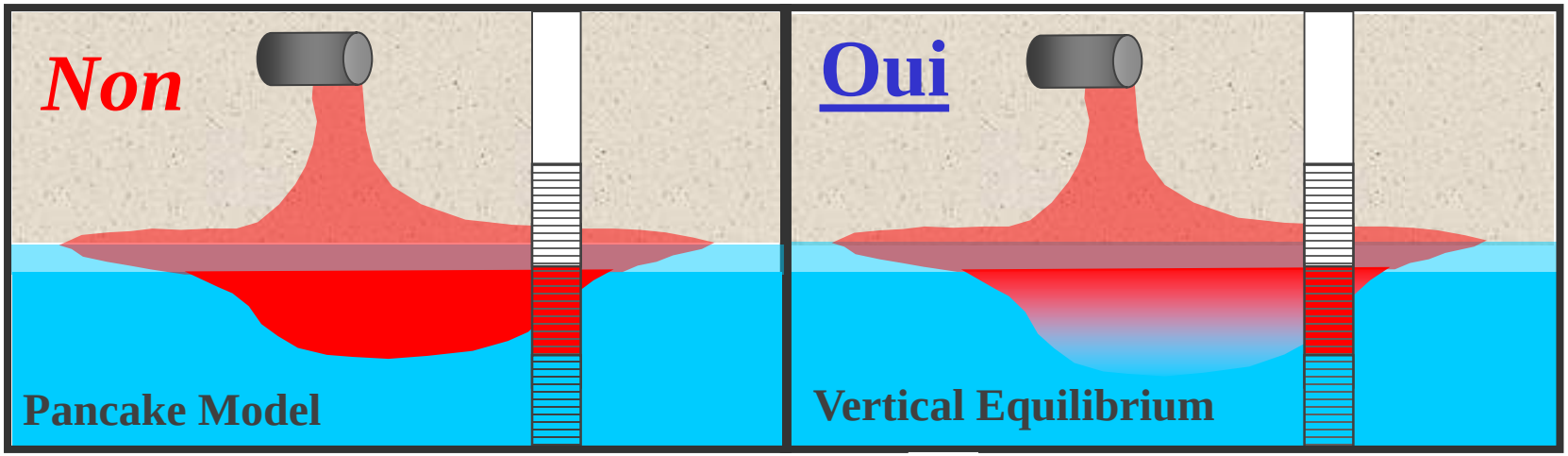
Perceptions générales concernant LNAPL

- LNAPL entre les pores facile, comme l'eau
- Tout LNAPL peut être récupéré
- Tous les pores dans une corps de LNAPL sont remplis avec LNAPL
- LNAPL se trouve au dessus de l'eau et ne penètre pas dans l'eau (comme une crêpe)
- L'épaisseur dans le Pz est egale l'épaisseur réelle avec un facteur de 2, 4, …
- L'épaisseur dans le Pz égale toujours l'épaisseur du formation
- Produit pure dans le Pz veut dire que c'est mobile et en migration
- Le corps de LNAPL bouge a cause du mouvement de l'eau souterraine
- Les corps de LNAPL bouge très longtemps

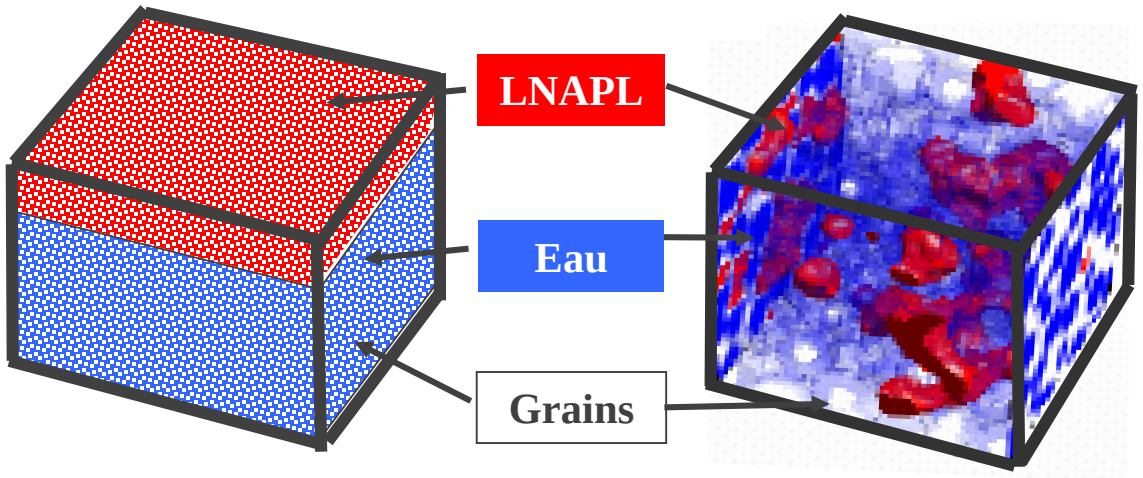
Copyright of RSK

Distribution verticale de LNAPL

Modèle de crêpe vs. Modèle d'équilibrium verticale



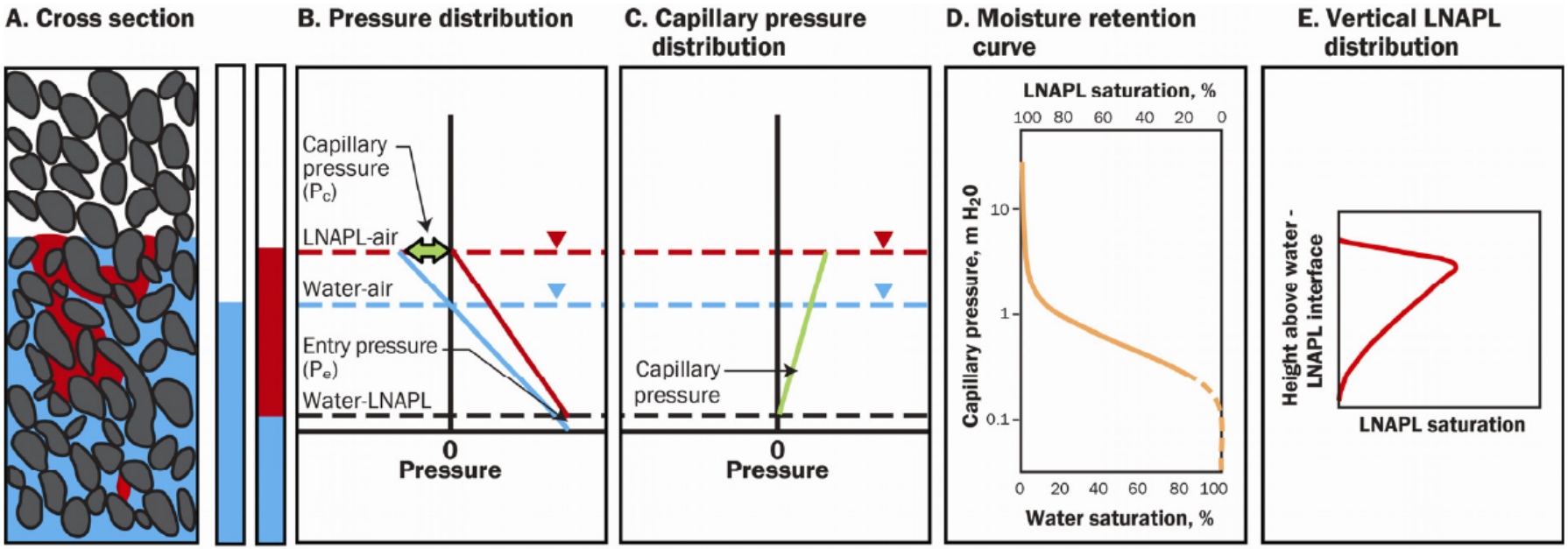
- Assume LNAPL flotte sur la nappe phréatique
- Saturation uniforme de LNAPL



- LNAPL pénètre dessous de la table de l'eau
- LNAPL et l'eau coexistent dans les pores

Copyright of RSK

Distribution verticale idealisée

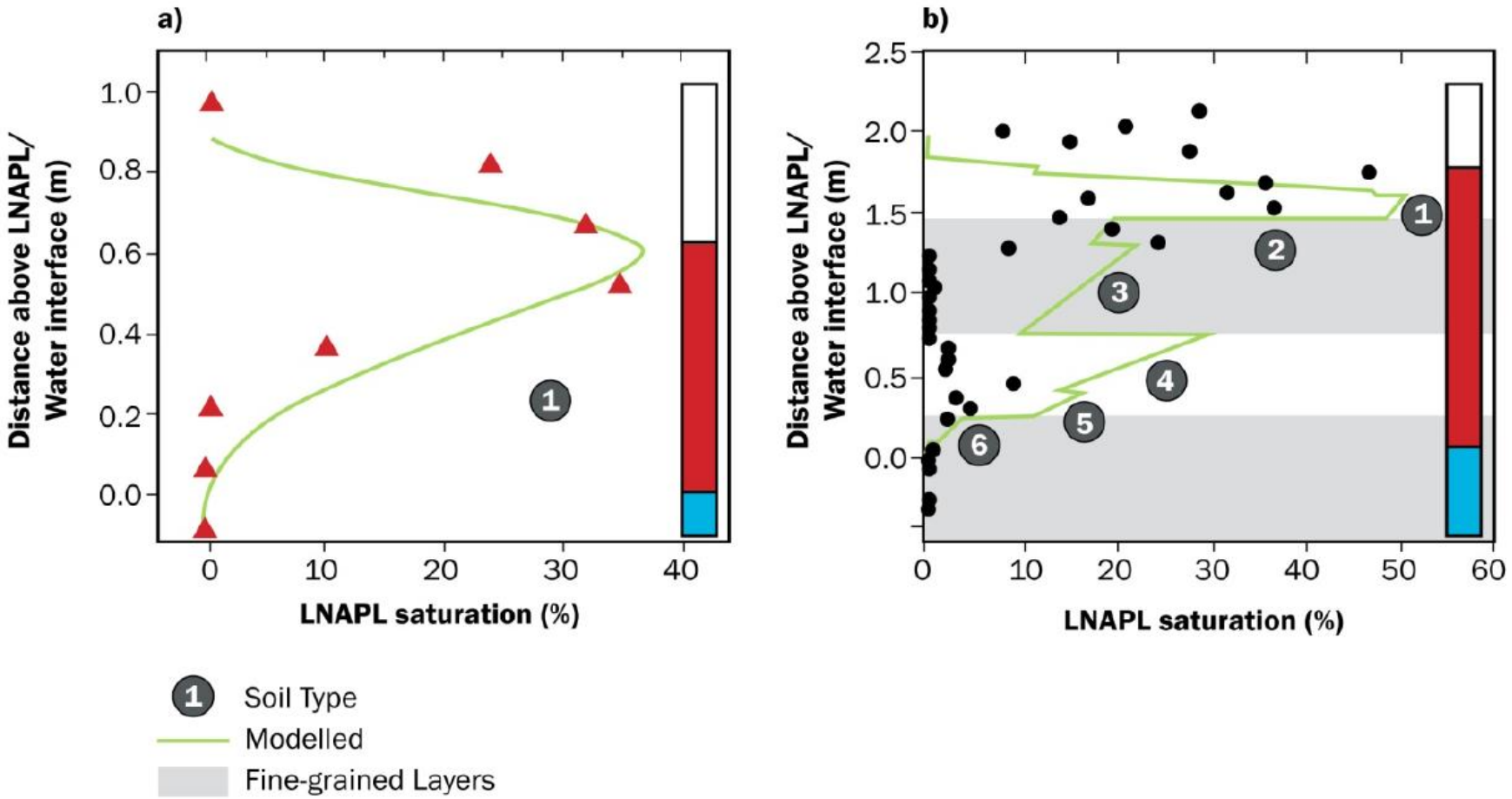


Aquifère homogène avec nappe libre:

- B / C: pression 0 = pression atmospherique
- D: saturation de l'eau et LNAPL dans la frange capillaire
- E: creé par ajouter l'info de C sur D $\Rightarrow$ distribution de LNAPL idealisé avec un forme d'aileron de requin

Copyright of RSK

Distribution verticale (exemple)



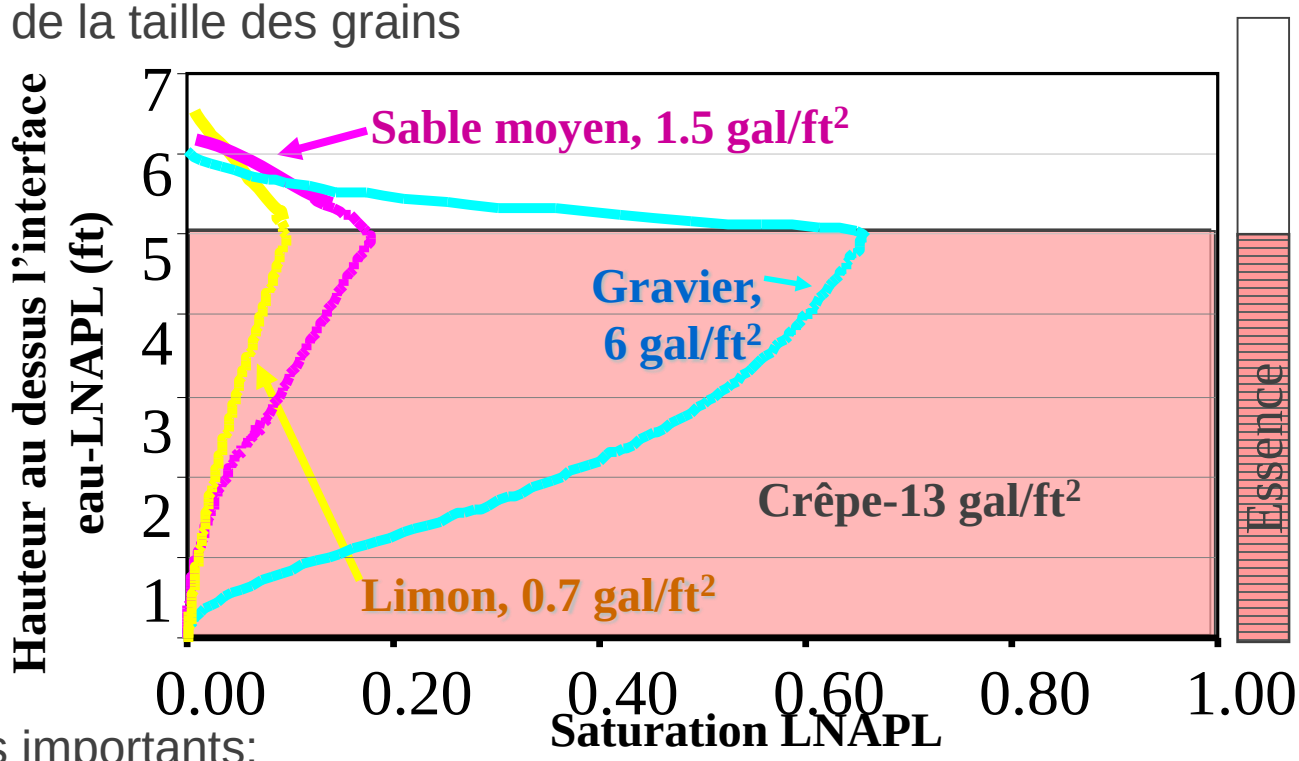
a) Aquifère homogène

b) Aquifère heterogène avec 2, 3 et 6 couches à grain plus fin

Copyright of RSK

LNAPL saturation distribution differents sols

Effets de la taille des grains



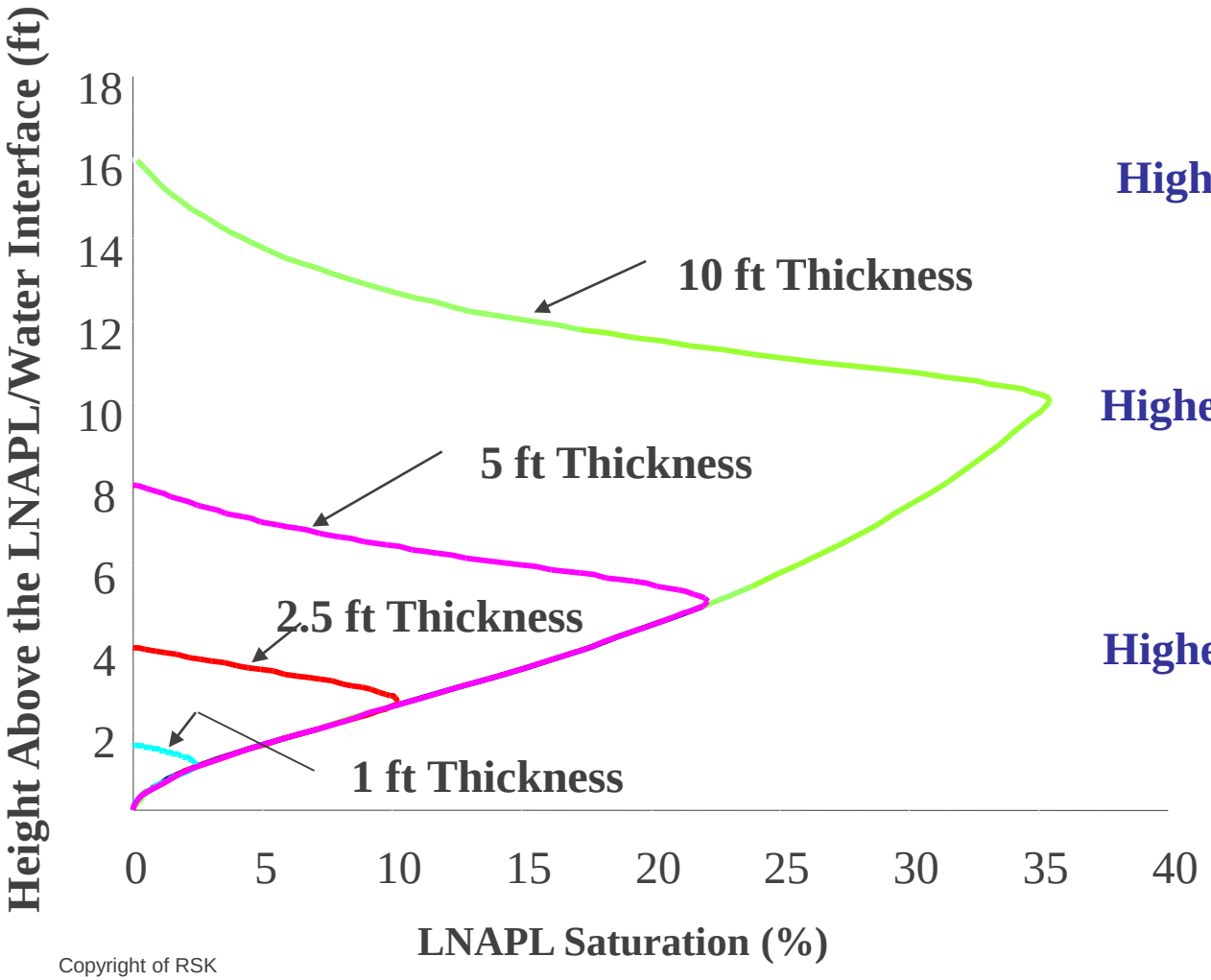
Points importants:

- Volumes basés sur le modèle crêpe (saturation uniforme) sont surestimés!
- Pour couche flottant donné, les saturations et les volumes de LNAPL seront différents pour différent types de sol

Copyright of RSK

Couche flottante et saturation

Distribution de diesel dans un sable limoneux



Type de sol

Higher thickness in well

Higher capillary pressure

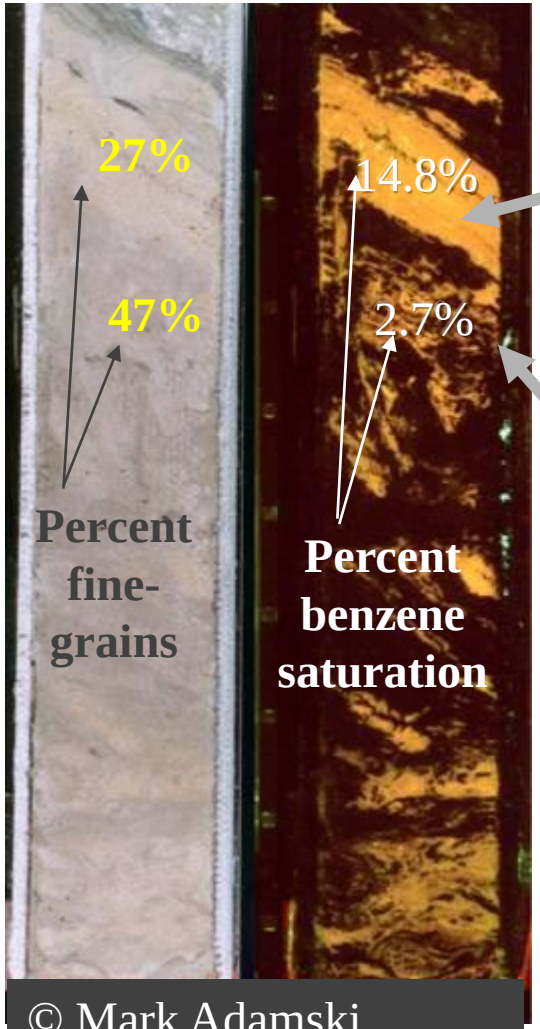
Higher LNAPL saturation

Copyright of RSK

Saturations de LNAPL et uniformité

Saturations de LNAPL ne sont pas uniforms

- Par préférence, LNAPL entre les pores le plus grand (déplacer l'eau est plus facile)
- Typiquement les saturations de LNAPL sont bas (5 à 30%) dans le sable
- Pour le sols à grain plus fin, la saturation de LNAPL sera même plus bas.



LNAPL saturation plus haut dans le sol à grain plus gros

LNAPL saturation plus bas dans le sol à grain plus fin

Lumière normale

Lumière UV

Copyright of RSK

Importance

- Le concept de saturation uniforme a comme résultat une surestimation de la volume de LNAPL si on se base sur l'épaisseur de la couche flottante dans le Pz
- Normalement LNAPL n'existe pas comme une couche distincte qui flotte sur la nappe avec une saturation de 100% ou uniforme
- Des attentes irréalistes de récupération en raison de CSM incorrecte

Copyright of RSK

Modèle conceptuel de LNAPL

Fluctuations de niveau d'eau souterraine et redistribution de LNAPL

Copyright of RSK

Perceptions générales concernant LNAPL

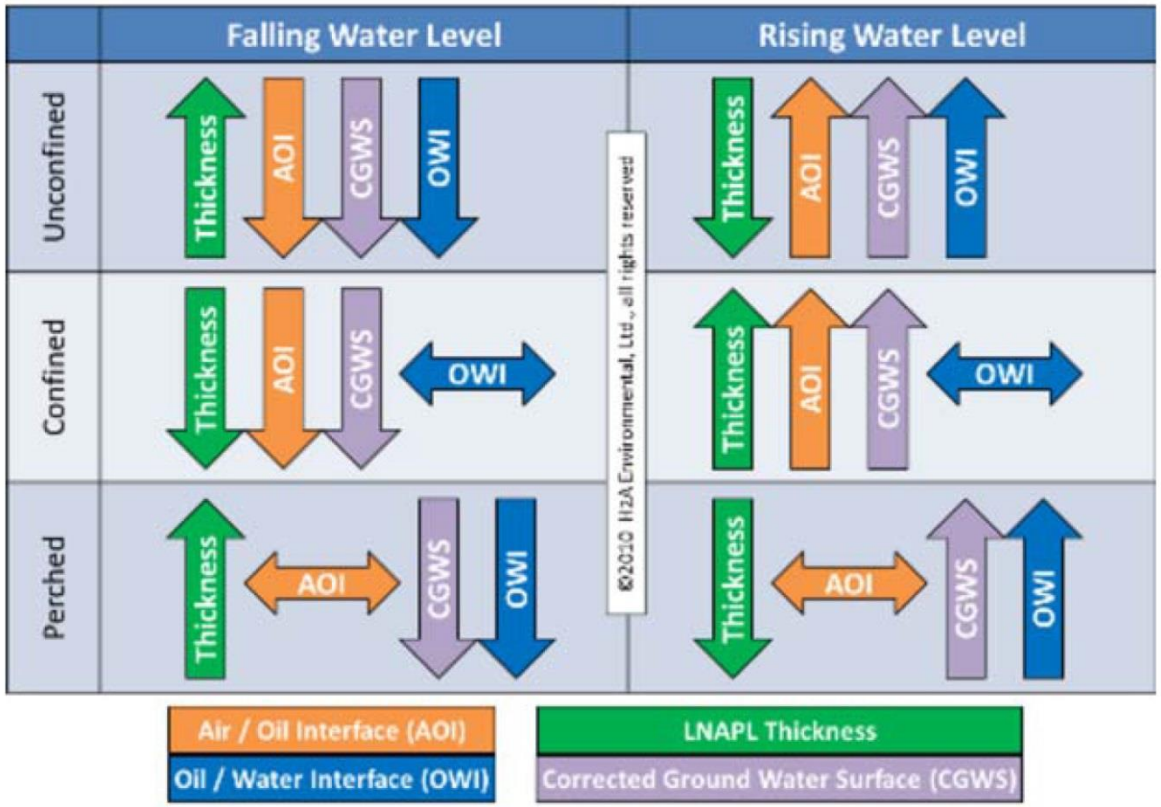
- LNAPL entre les pores facile, comme l'eau
- Tout LNAPL peut être récupéré
- Tous les pores dans une corps de LNAPL sont remplis avec LNAPL
- LNAPL se trouve au dessus de l'eau et ne penètre pas dans l'eau (comme une crêpe)
- L'épaisseur dans le Pz est egale l'épaisseur réelle avec un facteur de 2, 4, …
- L'épaisseur dans le Pz égale toujours l'épaisseur du formation
- Produit pure dans le Pz veut dire que c'est mobile et en migration
- Le corps de LNAPL bouge a cause du mouvement de l'eau souterraine
- Les corps de LNAPL bouge très longtemps

Copyright of RSK

Fluctuation de la nappe et LNAPL

Fluctuations de la nappe (saisonnières ou suite a extraction de l'eau) influence la distribution de LNAPL:

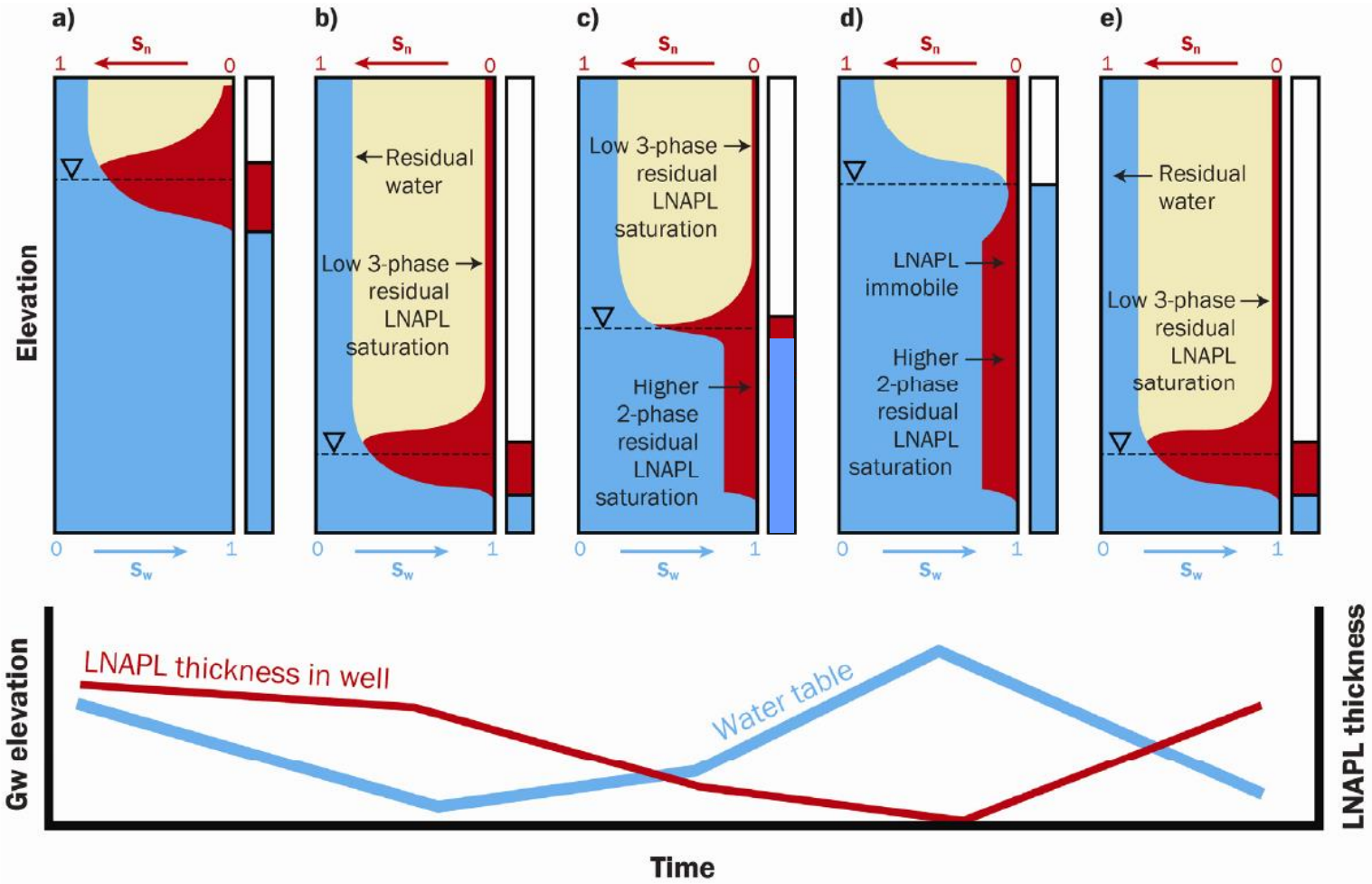
- Fluctuations typiques entre 1m (sable, gravier, grès) et 10m (craie, calcaire)
- Observations communes:
  - Même si les échantillons de sol indiquent la présence de LNAPL, il est bien possible que les Pz ne contiennent pas de LNAPL observable
  - Apparition soudaine ou la disparition de LNAPL in Pz
  - LNAPL peut disparaître si la nappe tombe sous l'intervalle normale
  - Nappe phréatique: l'épaisseur de la couche flottante a tendance de diminuer avec la montée de la nappe et d'augmenter avec la baisse de la nappe
  - Nappe captive: l'épaisseur de la couche flottante a tendance d'augmenter avec la montée de la nappe et de diminuer avec la baisse de la nappe



Copyright of RSK

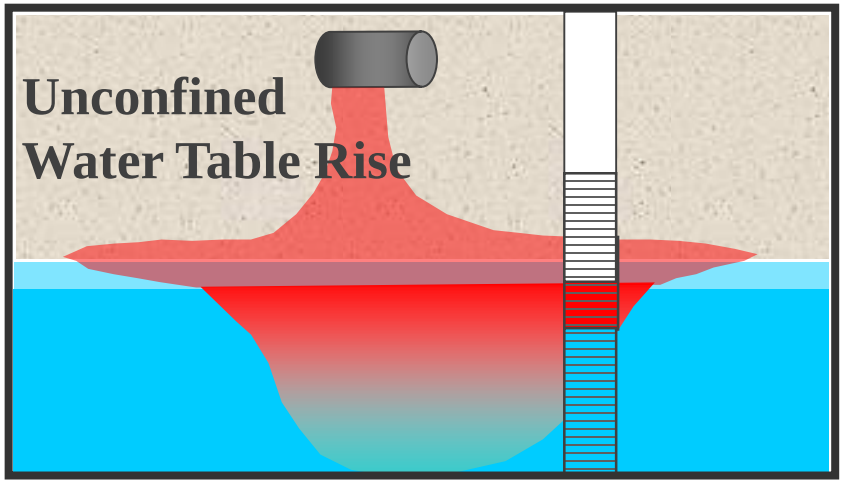
Nappe phreatique, aquifère homogène

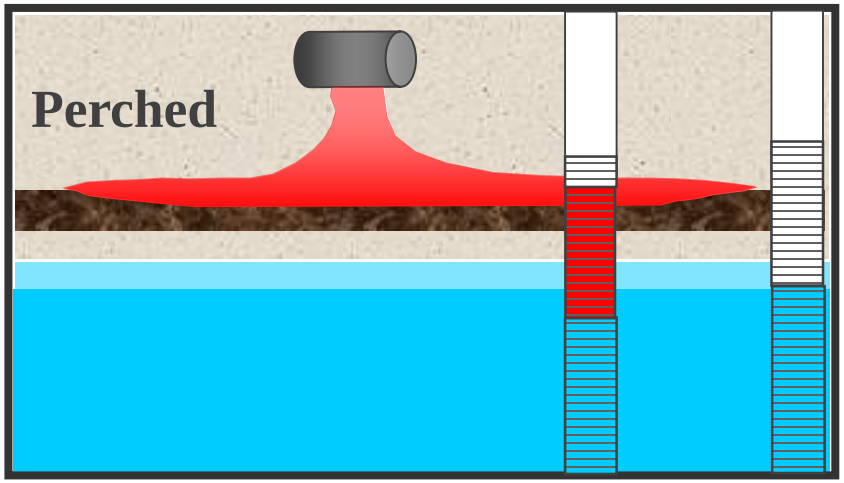
Conceptualisation de la variation de LNAPL observé dans le sol et le Pz

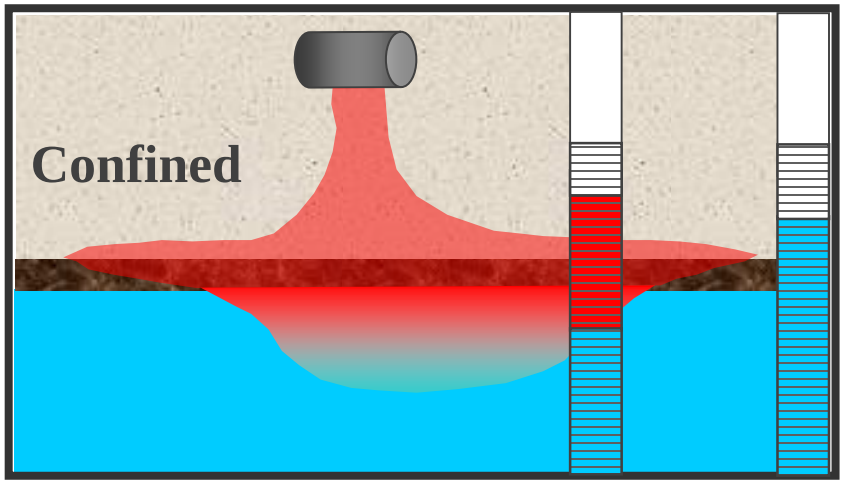


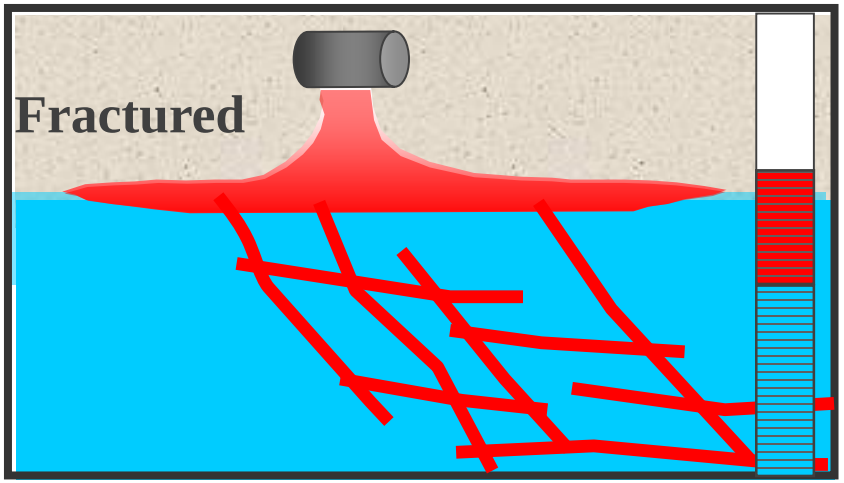
Copyright of RSK

Couche flottante et type d’aquifère









Copyright of RSK

Nappe phreatique, aquifère fissuré

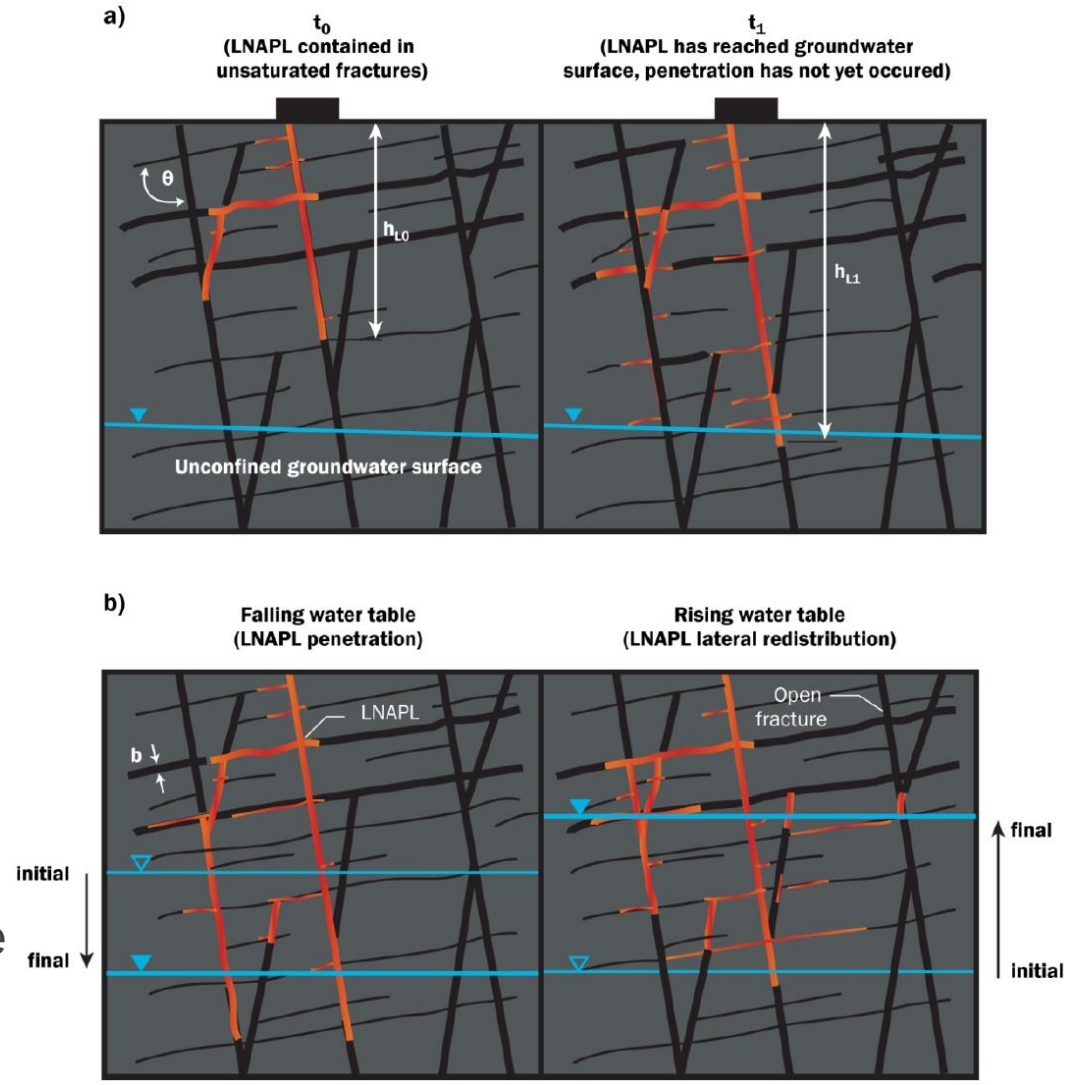
Aquifère fissuré:

- Macropores (fissures, trous par des racines, …): pression d'entrée (h_{LNAPL}) limité
- Volume de LNAPL dans les macropores est limitée, mais suffisante pour trouver dans les Pz

Pression d'entrée pourque LNAPL entre la fissure:

$$\Delta P_{LNAPL} = \frac{2\sigma_{LW}\cos\theta}{b}$$

- Avec b = ouverture fissure
- La flottabilité joue plus.



Copyright of RSK

LNAPL comportement et distribution

Sommaire

- LNAPL est distribué verticale avec des saturations variables (toujours < 100%)
- La saturation de LNAPL dépend du type de sol et pression capillaire
- Pour les nappes phreatiques, l'épaisseur de la couche flottante peut être correlé à la saturation dans le sol
- Pour les nappes perchées, captives ou fissurées, l'epaisseur de la couche flottante ne peut pas être utilisé pour prédire les saturations de LNAPL ou de l'épaisseur impacté dans le sol
- L'épaisseur de LNAPL et la réaction au changement du niveau d'eau sera différente pour les différentes systèmes d'aquifères

Copyright of RSK

Modèle conceptuel de LNAPL

Transport

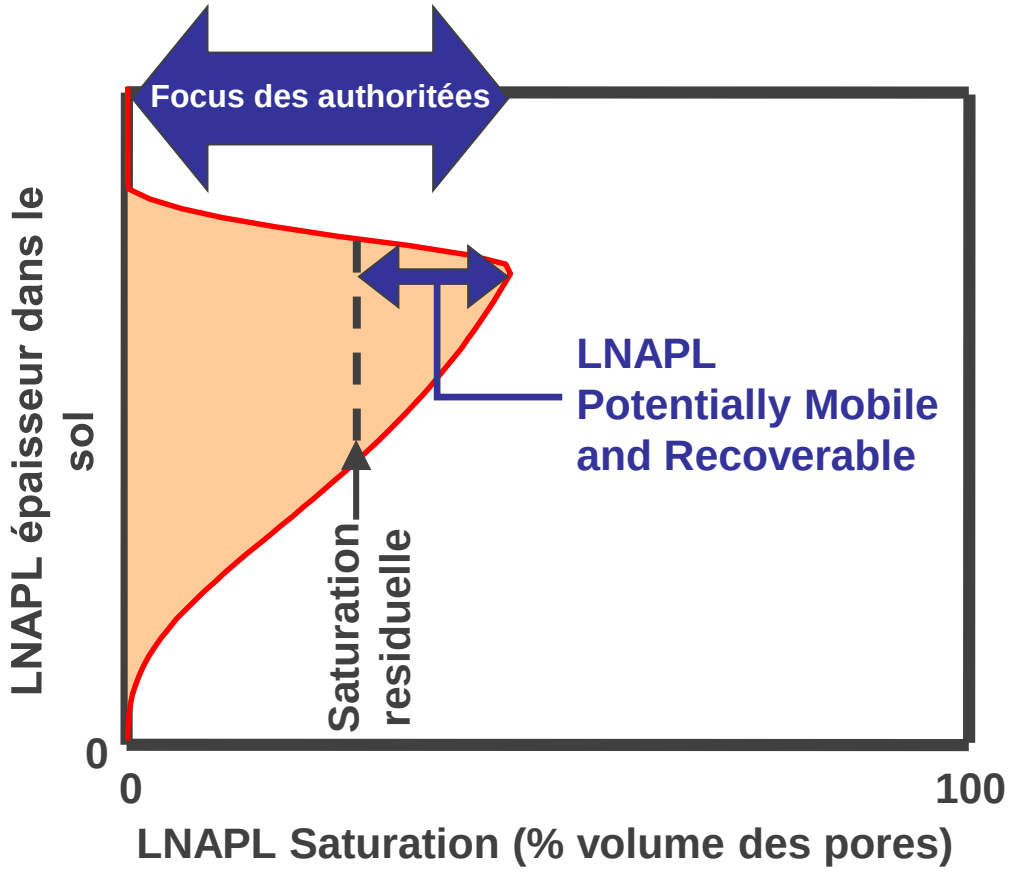
Copyright of RSK

Perceptions générales concernant LNAPL

- LNAPL entre les pores facile, comme l'eau
- Tout LNAPL peut être récupéré
- Tous les pores dans une corps de LNAPL sont remplis avec LNAPL
- LNAPL se trouve au dessus de l'eau et ne penètre pas dans l'eau (comme une crêpe)
- L'épaisseur dans le Pz est egale l'épaisseur réelle avec un facteur de 2, 4, …
- L'épaisseur dans le Pz égale toujours l'épaisseur du formation
- Produit pure dans le Pz veut dire que c'est mobile et en migration
- Le corps de LNAPL bouge a cause du mouvement de l'eau souterraine
- Les corps de LNAPL bouge très longtemps

Copyright of RSK

Fraction mobile de LNAPL



Point important:

- LNAPL est potentiellement mobile si sa saturation est plus grande que la saturation residuelle

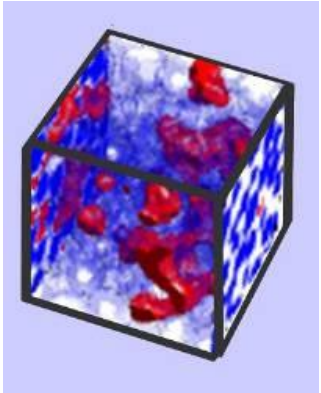
Copyright of RSK

Loi de Darcy pour LNAPL

Darcy pour eau: $q_w = K_w.i_w$

Darcy pour LNAPL: $q_L = K_L.i_L$

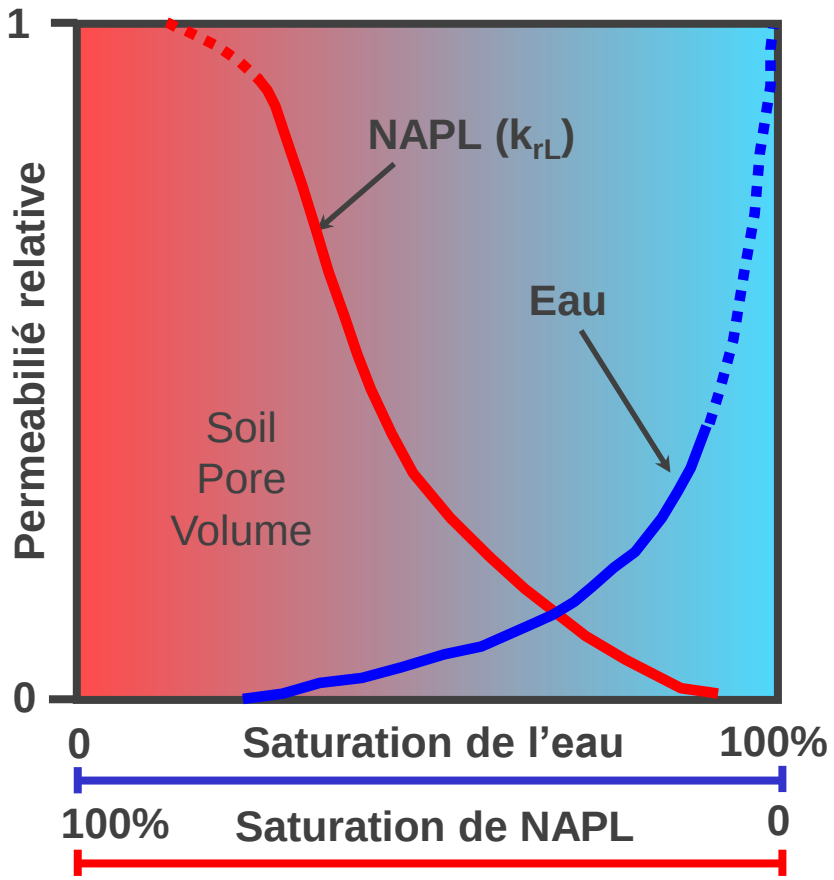
- $K_L = \frac{k_{rL} k \rho_L g}{\mu_L} = \frac{k_{rL} K_w \rho_L \mu_w}{\rho_w \mu_L}$
  - k = permeabilité intrinsic
  - k_{rL}=perméabilite relative de LNAPL
  - g = coefficient de gravité
  - ρ_L = densité LNAPL
  - ρ_w= densité eau
  - μ_L = viscosité LNAPL
  - μ_w = viscosité eau
  - i_L = gradient LNAPL
  - K_w = conductivité hydraulique
  - K_L = conductivité LNAPL



Paramètre	Trend paramètre	K_L	Effet sur écoulement de LNAPL (q_L)
Perméabilité relative de LNAPL (k_{rL})	↑	↑	↑
Densité de LNAPL (ρ_L)	↑	↑	↑
Viscosité de LNAPL (μ_L)	↑	↓	↓

Copyright of RSK

Permeabilité relative (k_r)



Eau et LNAPL dans le sol:

- Saturation relatif à permeabilité relative
- Permeabilité relative de l'eau ou de LNAPL est 1 si 100% saturation
- Permeabilité relative diminue vite quand la saturation baisse
- Sous saturation résiduelle, q diminue d'une manière exponantielle
- Permeabilité relative de LNAPL et de l'eau sont lié d'une manière inverse

Copyright of RSK

Permeabilité relative

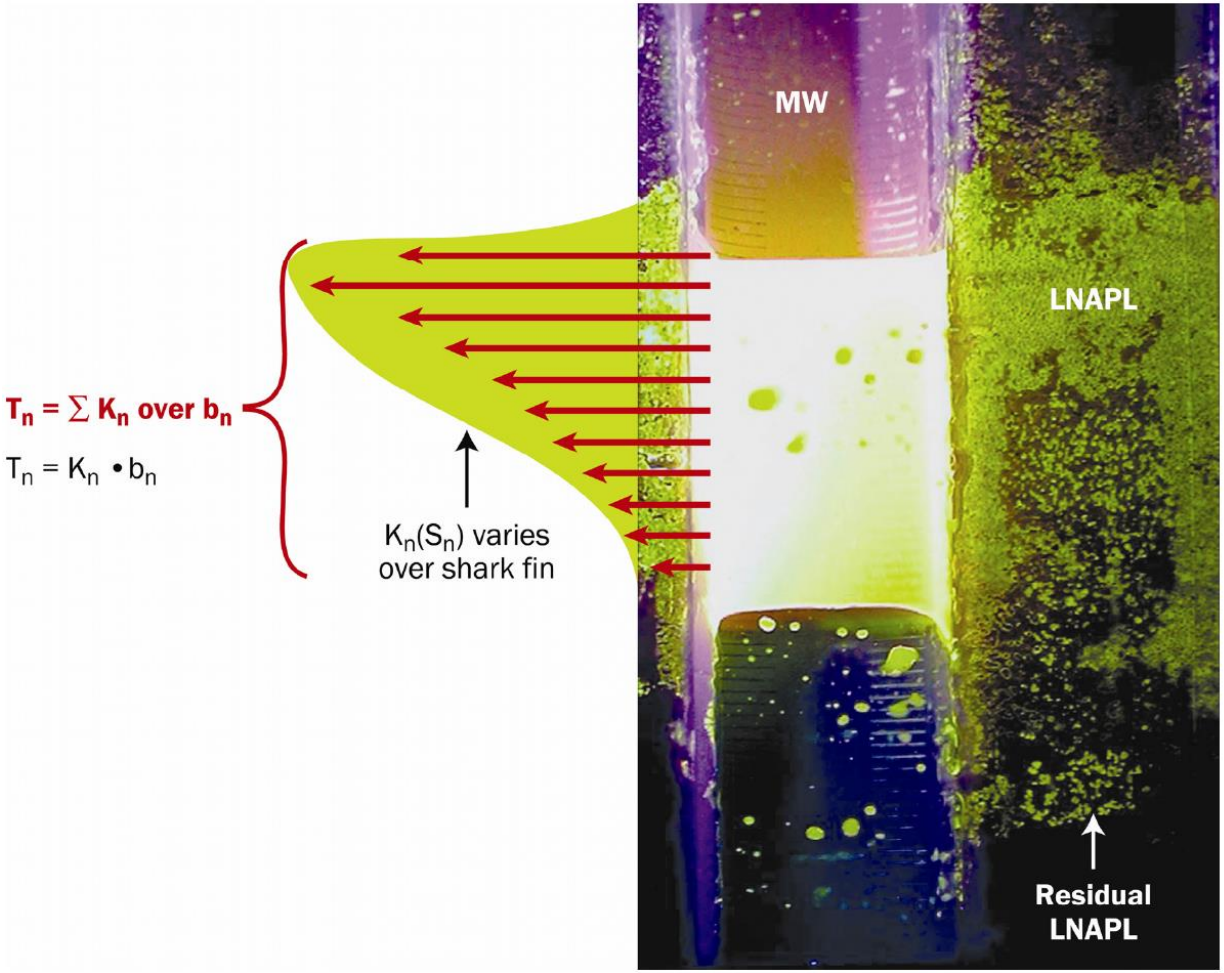
Point important:

- Centre du corps de LNAPL → saturation plus élevé → perméabilité relative plus élevé → q_L plus grand
- Périmètre du corps de LNAPL → q_L plus bas
- Quand la saturation de LNAPL approche la saturation résiduelle, la perméabilité relative de LNAPL devient zéro.

Copyright of RSK

Transmissivité de LNAPL

Relation visuelle entre T_L et saturation

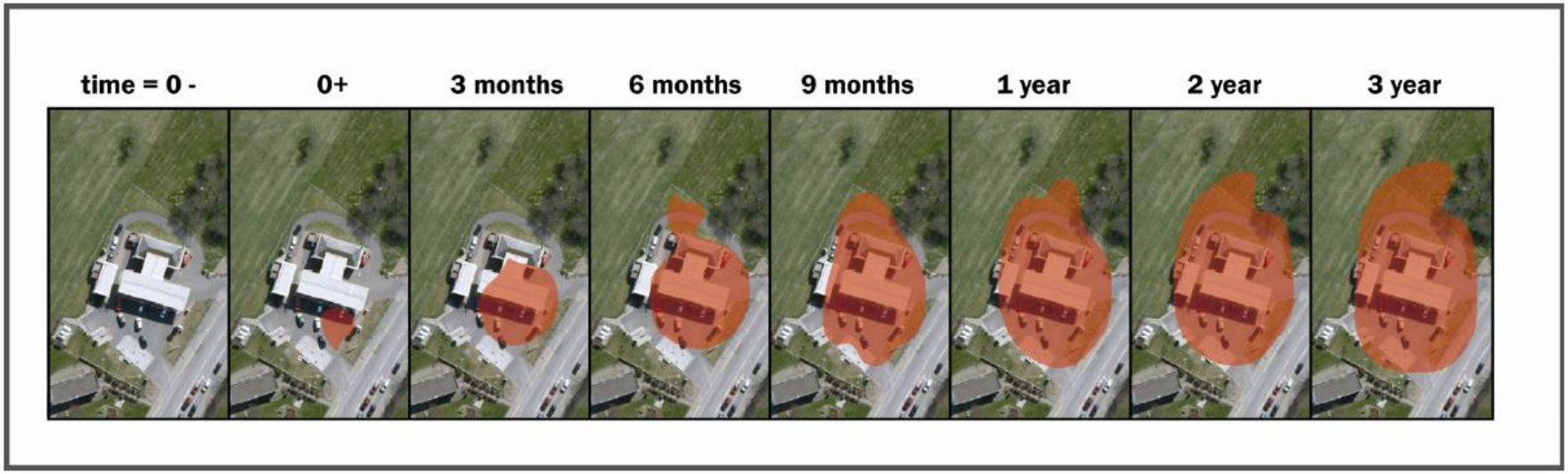


Copyright of RSK

Migration de LNAPL

Stabilité latérale de LNAPL

- Typiquement realisé après le premier année aprés fuite
- Plus vite pour LNAPL plus léger (essence) que pour des huiles
- Les bords deviennent auto-contenant (self-containing)



Copyright of RSK

Caractérisation des sites avec LNAPL

Investigation de la distribution de LNAPL

Copyright of RSK

Créer le LCSM (LNAPL CSM)

Données utilisables:

- Données existantes
- Méthodes directes
- Méthodes indirectes
- Méthodes de laboratoire
- Base de données, valeurs d’expérience

Copyright of RSK

Données existantes - sol

HCT total pour calculer la saturation approximative de LNAPL

- $S_{NAPL} = \frac{\rho_{sol}.HCT}{\rho_L.n.10^6}$
  - S_{LNAPL} = saturation de LNAPL (-)
  - ρ_{sol} = masse volumique apparente de sol (g/cm³)
  - ρ_L = densité de LNAPL (g/cm³)
  - HCT = hydrocarbures totales (mg/kg)
  - n = porosité

Information des profils de forages existants:

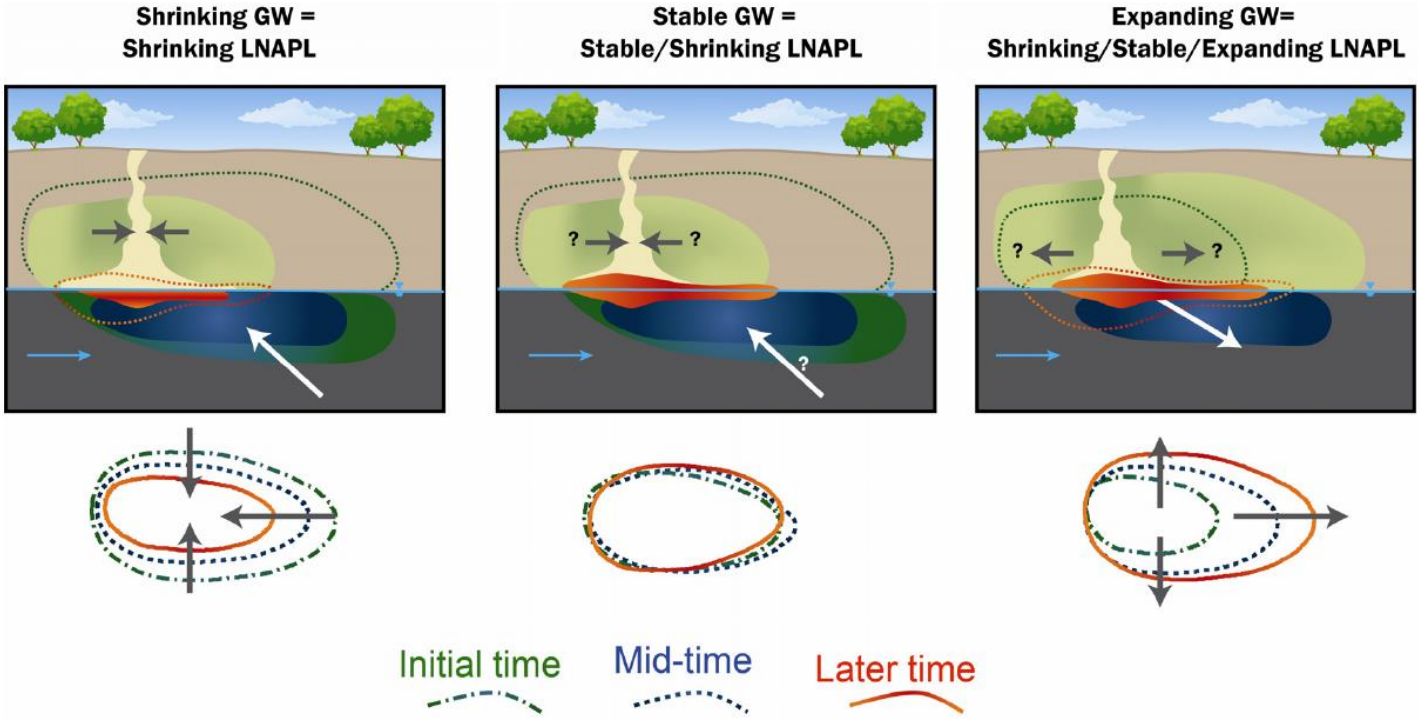
- Taches, odeur, mesures PID

Copyright of RSK

Données existantes – eau souterraine

Cartographie des plume dissous

- Caractériser le forme, la taille et la profondeur de la zone source
- Une plume dans l'eau souterraine en contraction ou stable = corps de LNAPL en contraction ou stable

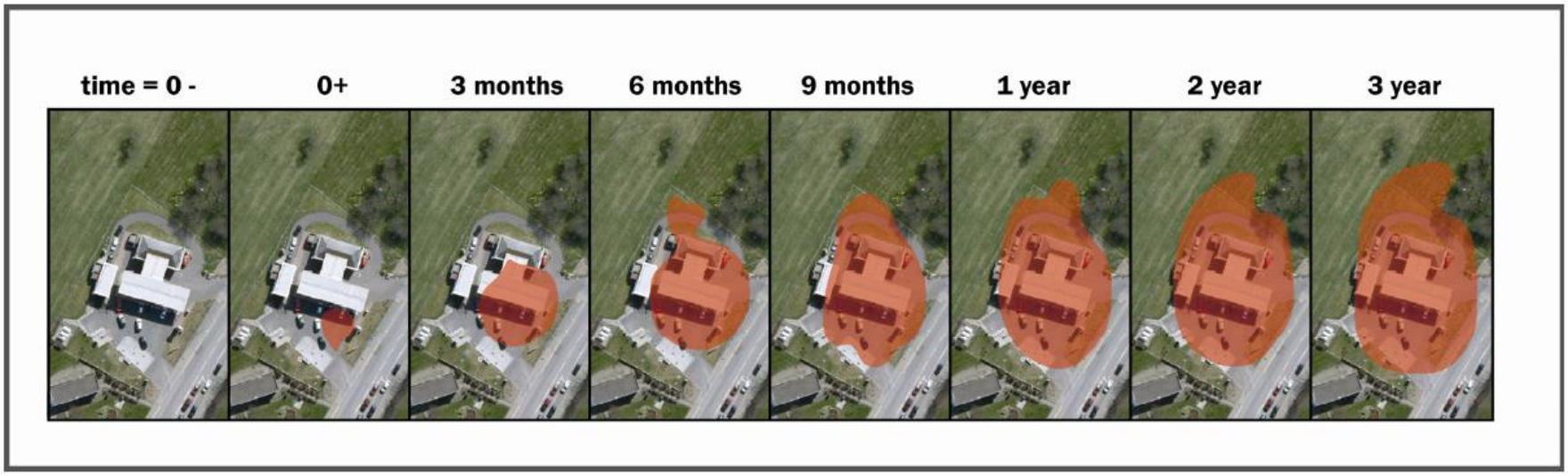


Groundwater Iso-Concentrations vs. Time

Données existantes - LNAPL

Données historiques de l'épaisseur de LNAPL

- Limites de la saturation de LNAPL et profondeur verticale
- Caractérisiques de la zone source
- Conditions de l'aquifère (captive, phreatique)
- Stabilité latérale du corps de LNAPL



Copyright of RSK

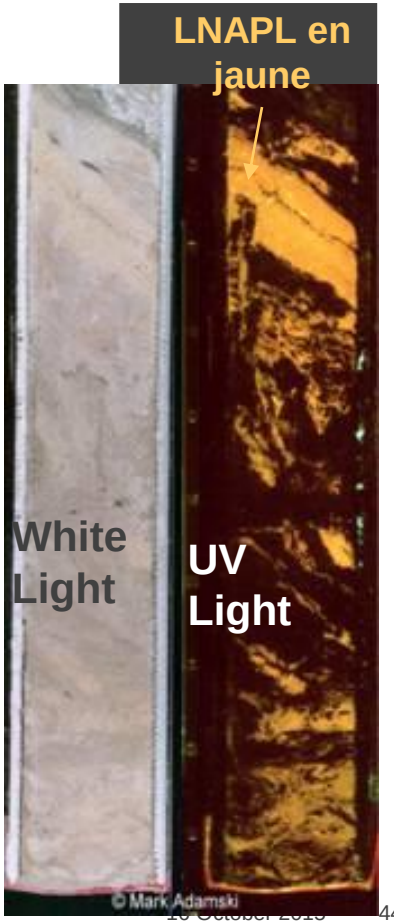
Forages continus, mésures de terrain

Profils de forage détaillé dans le zone de LNAPL

- Si possible, echantillonage continu
- Lithologie, contenu d'eau, odeur, structure, mésures PID

Utilisation des colorants et lumière UV peut aider pour trouver LNAPL

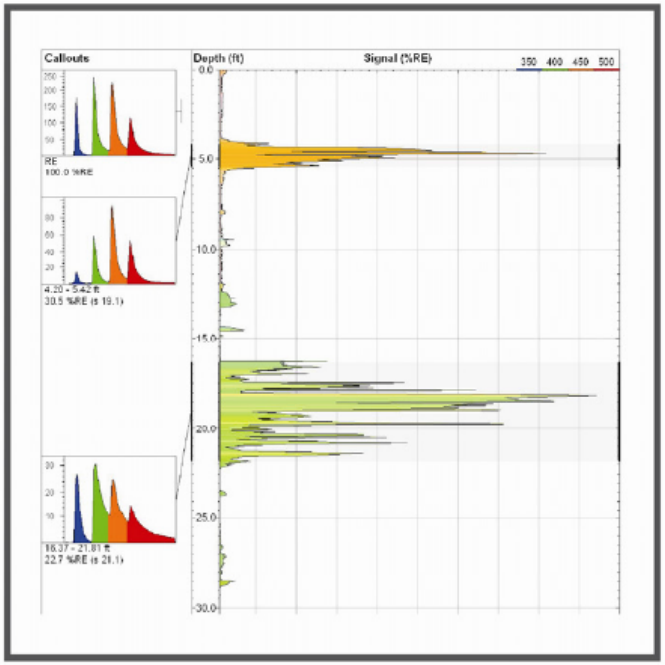
Utilisation des données de la laboratoire

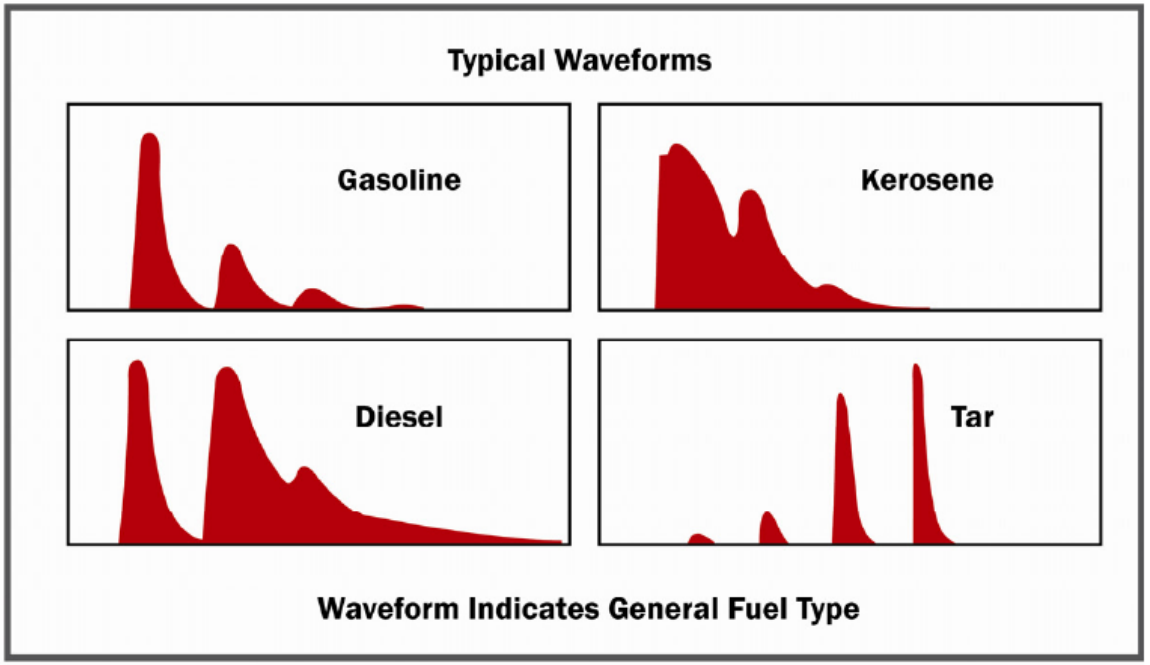


Copyright of RSK

Direct push - Laser Induced Fluorescence (LIF)

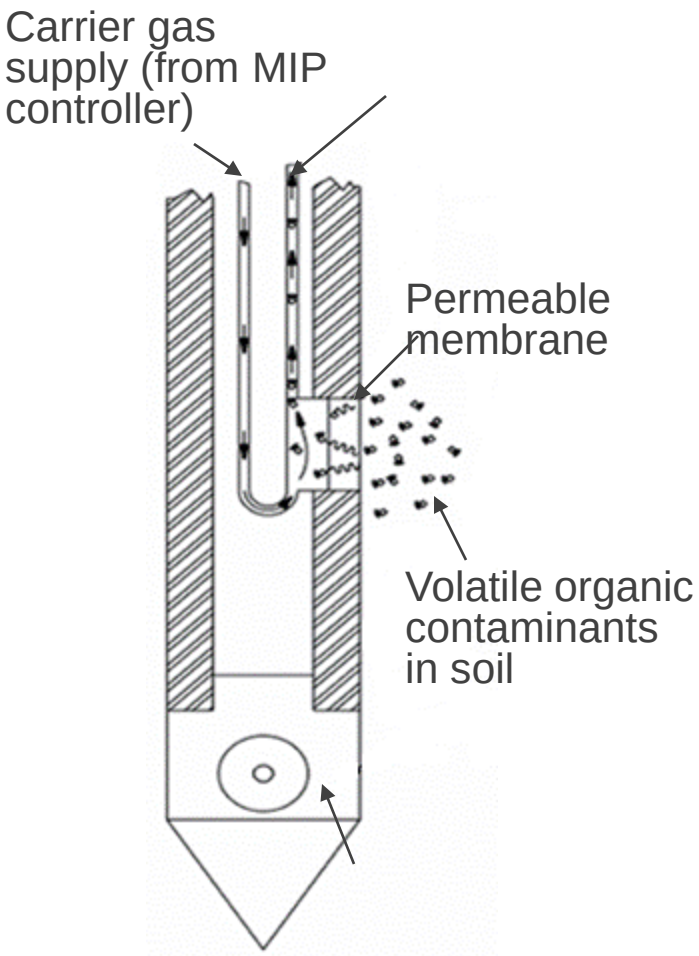
- LIF donne information détaillé, qualitative ou semi-qualitative de la distribution des componants fluorescants dans LNAPL (= PAH).
- Signature specifique pour determiner le type de LNAPL
- Typiquement fait en semble avec CPT (cone penetrometer testing)





Copyright of RSK

Direct push - Membrane Interface Probe (MIP)

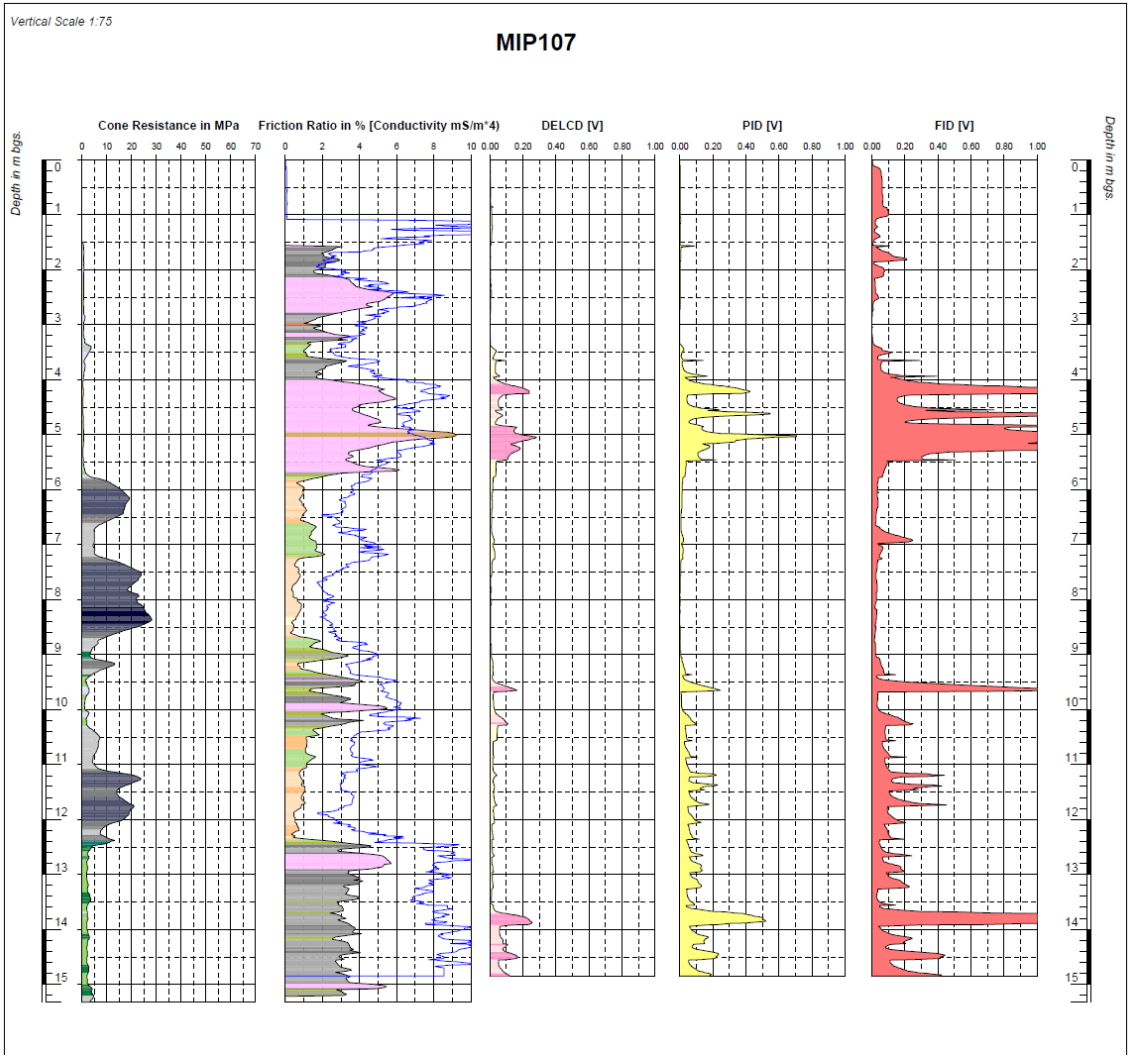


(image courtesy Geoprobe)

- MIP donne information détaillé, qualitative ou semi-qualitative de la distribution sur base de PID, FID, DELCD.
- Pas de signature specifique pour determiner le type de LNAPL
- Typiquement fait en semble avec CPT (cone penetrometer testing)
- Typiquement utilisé pour determiner la distribution des composants volatiles

Copyright of RSK

Direct push - Membrane Interface Probe (MIP)

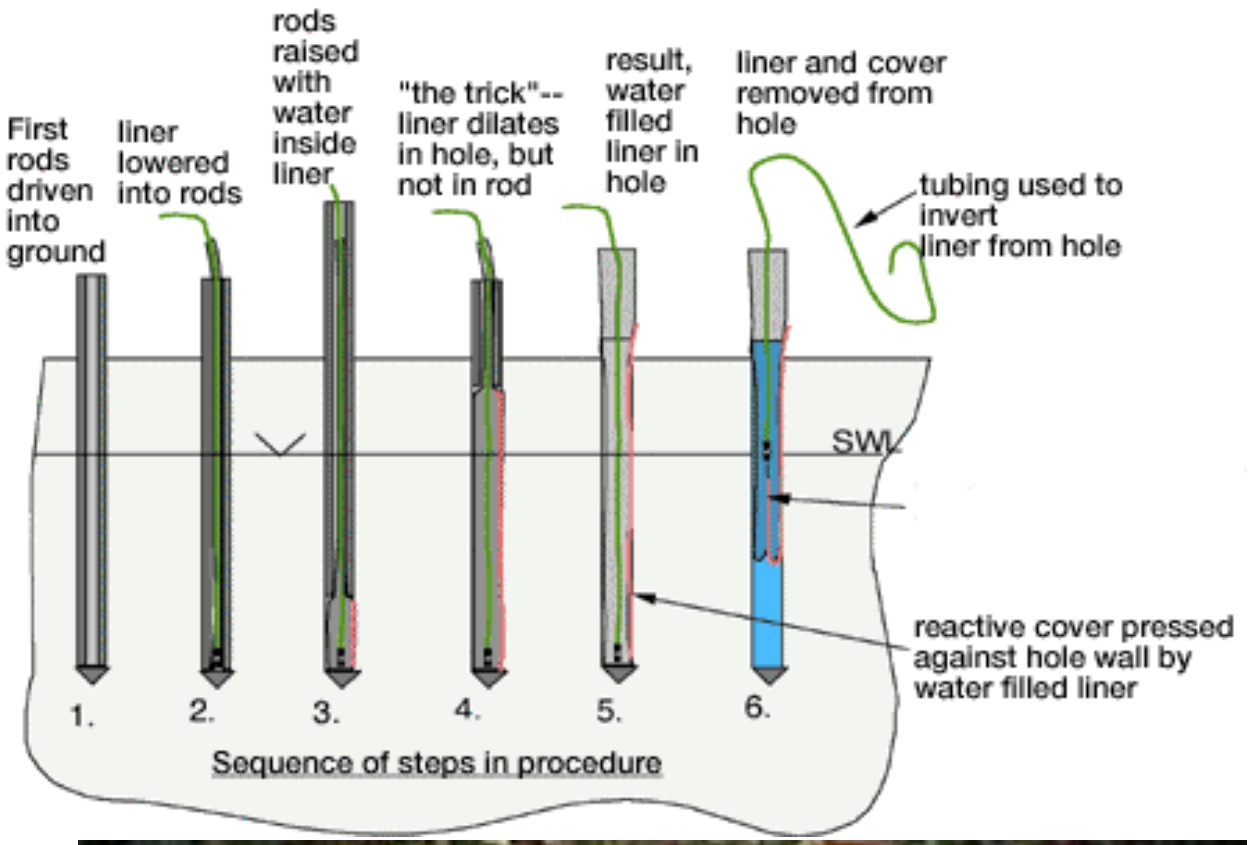


Copyright of RSK

Flexible absorbent borehole liners

FLUTe

- Liner flexible qui change de couleur en contact avec NAPL
- Peut être intéressant pour déterminer les fissures dans les roches pour identifier NAPL



Copyright of RSK

Caractérisation des sites avec LNAPL

Investigation de la mobilité de LNAPL

Copyright of RSK

Monitoring utilisant piézomètres

Pz dans le zone source:

- Niveau de filtre doit être correct
- Mesures d'épaisseur de la couch flottante
  - Changement dans le centre vis-à-vis changements au bord du corps
  - Utiliser pour déterminer la situation geohydrologique
  - Utiliser pour déterminer le gradient de LNAPL
  - Comparer les données avec la pression nécessaire pour entrer les pores

Copyright of RSK

Analyse des echantillons de LNAPL

Caractéristiques analysé:

- Densité, viscosité, tension de surface
- Peut aussi être trouvé dans les bases de données (p.e. API)

GC fingerprinting

- Interpretation de la chromatogramme
- Analyse TPHCWG (split aliphatique/aromatique)

Copyright of RSK

Mesures de terrain

- LNAPL baildown/slug test
  - Simple
  - Similaire au test pour l'eau mais avec les facteurs de LNAPL incorporé
  - Résultat seulement valable autour Pz
- LNAPL skimmer test
  - Durée plus long
  - Résultat plus accurate
- Recovery data based methods
  - Volumes extraits, épaisseur et autres données sont utilisées pour calculer la transmissivité
- Tracer test
  - Injection d'un tracer fluorescant
  - La vitesse de dilution du tracer est utilisé pour les calcules

Copyright of RSK

References

Copyright of RSK

References

- CL:AIRE, 2014. An illustrated handbook of LNAPL transport and fate in the subsurface. CL:AIRE, London. ISBN 978-1-905046-24-9. Download www.claire.co.uk/LNAPL
- API (American Petroleum Institute), 2004. API interactive LNAPL guide version 2.04. www.api.org
- ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council), 2009. LNAPL Training Part 1: An Improved Understanding of LNAPL behavior in the Subsurface. www.itrcweb.org
- ITRC, 2009. LNAPL Training Part 2: LNAPL Characterization and Recoverability www.itrcweb.org
- Applied NAPL Science Review (ANSR) www.h2altd.com

Copyright of RSK

Q & A

Copyright of RSK

RSK