

PARAMETRII MIGRĂRII FLUIDELOR IMISCIBILE

3.4.2. Parametri ai migrării fluidelor imiscibile în acvifere	178
3.4.2.1. Fluide imiscibile mai ușoare decât apa.....	183
Formarea acumulării de fluid	183
Determinarea grosimii stratului de fluid acumulat	185
Efectul oscilației nivelului piezometric al acviferului	187
Calcul volumului de fluid recuperabil	187
3.4.2.2. Fluide imiscibile mai grele decât apa.....	189
Formarea acumulării de fluid	190
Determinarea grosimii stratului de fluid acumulat	190
Deplasarea fluidului fg în zona saturată	191

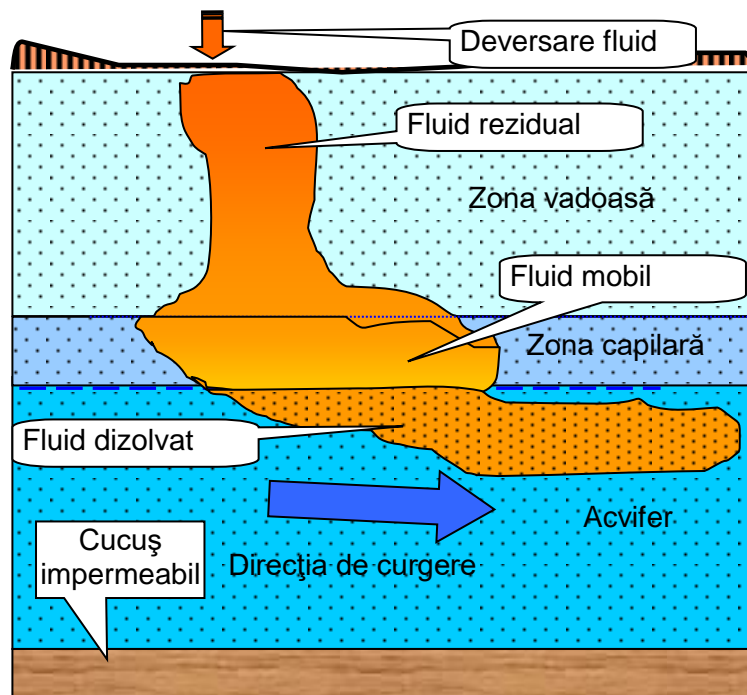


Fig.3.63. Distribuția pe verticală a celor trei componente ale fluidelor imiscibile mai ușoare decât apa (*fu*).

3.4.2. Parametri ai migrării fluidelor imiscibile în acvifere

În timpul curgerii polifazice a **fluidelor imiscibile**, fiecare fluid are la dispoziție pentru a se deplasa o **fracțiune** din spațiul poros disponibil. Pentru descrierea deplasării fiecărui fluid s-a definit **permeabilitate relativă** (K_r), ca raport între permeabilitatea unui fluid aflat la un anumit grad de saturație și **permeabilitatea intrinsecă** a formațiunii.

Permeabilitatea relativă a unui fluid este condiționată de **gradul de saturație** al formațiunii cu fluid precum și de **unghiul de contact** (*udă* sau *nu udă*) dintre fluid și faza solidă prin care este reprezentată formațiunea permeabilă.

Gradul de saturație al unei formațiuni cu un anumit **fluid** (S_f)

este definit ca raport între **volumul de fluid** aflat în porii rocii (V_f) și **volumul total al porilor** (V_p):

$$S_f = \frac{V_f}{V_p} \quad (3.170)$$

Valorile gradului de saturație pot fi exprimate și în procente. Suma gradului de saturație a **tuturor fluidelor** aflate în porii unei formațiuni, inclusiv **aerul**, este egală cu 1,0 sau 100%. După cum un fluid ocupă o fracțiune mai **mică** sau mai **mare** din spațiul poros disponibil, acesta se va deplasa mai **greu** respectiv mai **ușor**.

În sistemele acvifere, **apa** este de cele mai multe ori fluidul care **udă** matricea minerală. Dacă există și un al doilea fluid imiscibil, de exemplu **petrolul**, acesta va fi din categoria celor care **nu udă** matricea minerală.

Gradul de saturație al spațiului poros cu fluidele prezente (de exemplu: apă și petrol) influențează în mod determinant valorile **permeabilității relative** (**Fig.3.55**).

Saturația ireductibilă în apă (S_{ia}) este determinată de conținutul de apă fixată pe suportul mineral solid. Această apă nu participă la curgere și permeabilitatea ei relativă este nulă. Imediat ce saturația ireductibilă a apei este depășită, permeabilitate relativă crește rapid, atingând valoarea maximă ($K_r = 1$) la saturația totală a spațiului poros cu apă.

În mod analog, pentru **petrol** (fluid care nu udă scheletul mineral) există o **saturație reziduală în petrol** (S_{rp}) sub care petrolul nu se poate deplasa și permeabilitatea lui relativă este nulă. O mică parte din petrol, cea care este **solubilă** în apă, se poate deplasa cu apa chiar sub saturația reziduală în petrol. Imediat ce saturația reziduală în petrol este depășită acesta începe să se deplaseze și permeabilitatea lui relativă crește proporțional cu saturația până la valoarea maximă.

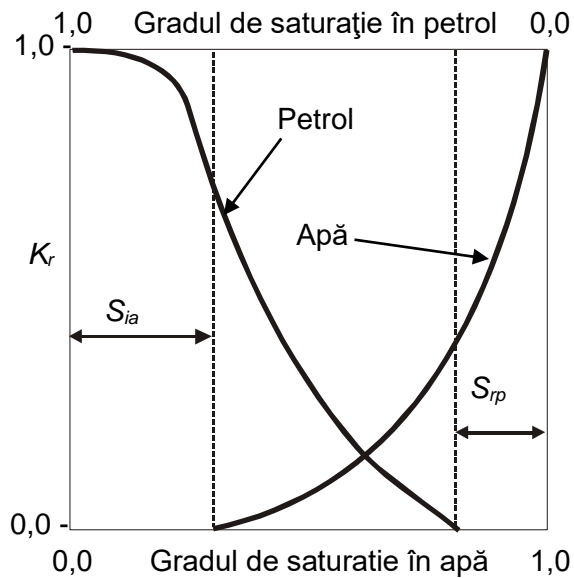


Fig.3.55. Variația permeabilităților relative pentru apă și petrol într-un sistem bifazic.

Permeabilitatea relativă este determinată în **laborator** pe probe de dimensiuni reduse. Pentru un sistem cu două fluide (exemplu: apa și petrol) experimentul se desfășoară în două etape:

- creșterea saturației în apă prin injectarea apei și dezlocuirea petrolului (*inundare*);
- reducerea saturației în apă prin injectarea petrolului și dezlocuirea apei (*drenaj*).

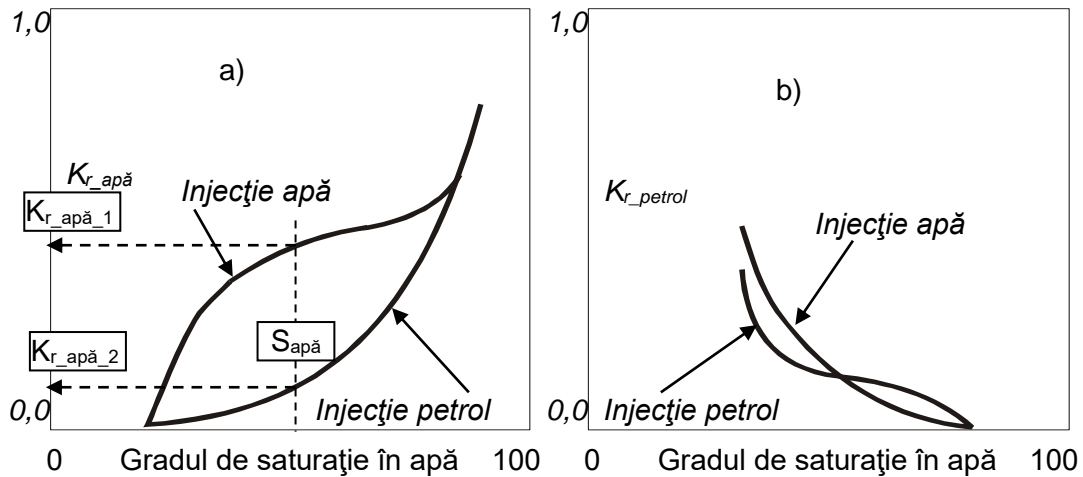


Fig.3.56. Determinarea experimentală a permeabilității relative a apei în raport cu petrolul ($K_{r_ap\grave{a}}$) și a petrolului în raport cu apa (K_{r_p})(C.Lin, G.F.Pinder, 1982)

Pe baza rezultatelor obținute în cele două etape ale experimentului rezultă diagramele permeabilității relative ale apei față de petrol și petrolului față de apă (**Fig.3.56**), cu următoarele caracteristici:

- variația **permeabilității relative a apei** în prezența petrolului ($K_{r_ap\grave{a}}$) prezintă un puternic histerezis determinat de fluidul care este dezlocuit (**Fig.3.56;a**). La aceeași saturație în apă ($S_{ap\grave{a}}$), conductivitatea relativă a apei determinată la **injectarea apei** ($K_{r_ap\grave{a}_1}$) este mult mai mare decât conductivitatea relativă a apei determinată la **injectarea petrolului** ($K_{r_ap\grave{a}_2}$).
- fenomenul de histerezis este mult mai atenuat pentru **permeabilitatea relativă a petrolului** (K_{r_petrol}) în prezența apei (**Fig.3.56;b**).

Permeabilitatea relativă pentru **sisteme trifazice**, de tipul aer – apă - petrol, întâlnite de regulă în **zona nesaturată**, sunt în relații mult mai complexe.

Variația permeabilității relative a unui fluid imiscibil (exemplu: petrolul) într-un sistem trifazic (aer – apă - petrol) se reprezintă grafic în diagrame ternare (**Fig.3.57**).

Pentru stabilirea corelațiilor dintre permeabilitățile relative se determină într-o **primă etapă** permeabilitatea relativă pe sistemele bifazice componente, adică:

- **permeabilitatea relativă a apei** (K_{r_apa}), ca o funcție de **saturația în apă**, pentru un sistem bifazic **apă-petrol**;
- **permeabilitatea relativă a aerului** (K_{r_aer}), ca o funcție de **saturația în aer**, pentru un sistem bifazic **aer-petrol**;
- **permeabilitatea relativă a petrolului** ($K_{r_petrol}^*$), într-un sistem bifazic **apă-petrol** la saturația reziduală în apă (conținut maxim de petrol);
- **permeabilitatea relativă a petrolului** ($K_{r_petrol}^{apa}$) într-un sistem bifazic **apă-petrol**, în funcție de gradul de saturație în **apă**.

- **permeabilitatea relativă a petrolului** ($K_{r_petrol}^{aer}$) într-un sistem bifazic **aer-petrol**, în funcție de gradul de saturație cu **aer**.

În a **doua etapă** se stabilește relația pentru estimarea permeabilității relative a celui de-al treilea fluid, petrolul, în sistemul trifazic (K_{r_petrol}), pe baza unor relații de tipul (Faust, 1985):

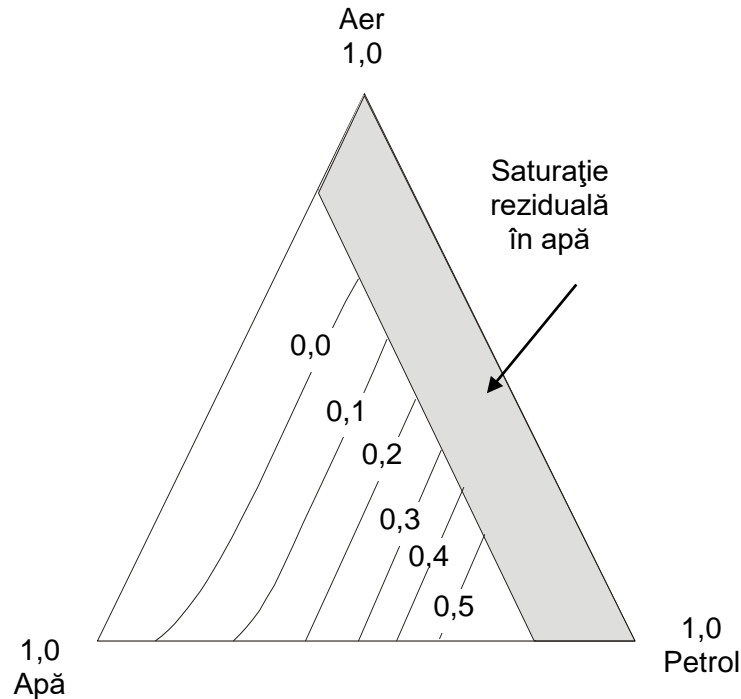


Fig.3.57. Diagramă ternară pentru permeabilitatea unui fluid imiscibil cu apa (de tipul celor mai ușoare ca apa: petrol; după Faust, 1985)

$$K_{r_petrol} = K_{r_petrol}^* \left[\left(\frac{K_{r_petrol}^{apa}}{K_{r_petrol}^*} + K_{r_apa} \right) \left(\frac{K_{r_petrol}^{aer}}{K_{r_petrol}^*} \right) - (K_{r_apa} - K_{r_aer}) \right] \quad (3.172)$$

Deplasarea fluidelor imiscibile până în zona unde se acumulează se face sub acțiunea **potențialului** de care dispun. Potențialul total al curgerii fluidelor (Φ) are două componente:

- potențialul datorat **presiunii apei din pori** ($\Psi(w)$);
- potențialul datorat **poziției** (Z) în care se află în câmpul gravitațional.

$$\Phi = \Psi(w) + Z \quad (3.172)$$

în care

w - umiditatea formațiunilor .

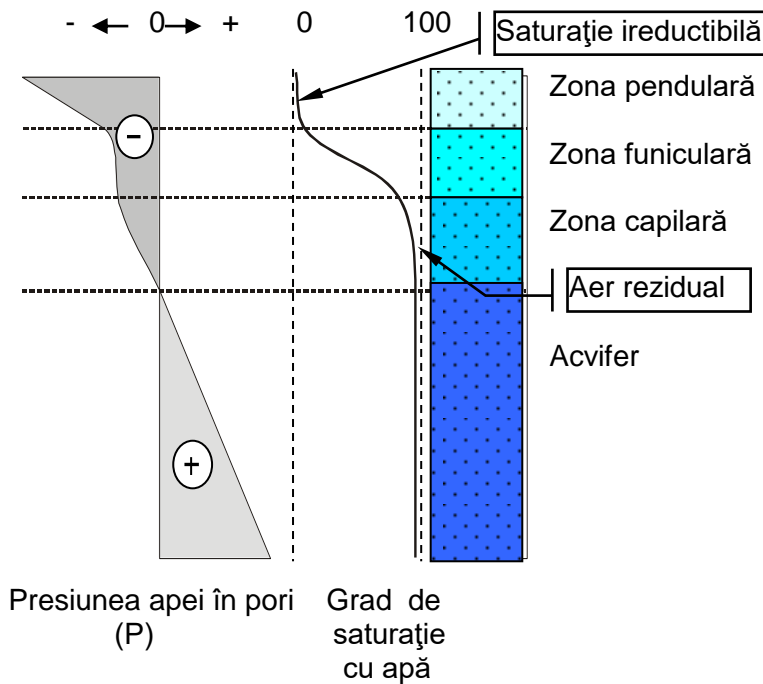
Potențialul curgerii apelor subterane reprezintă energia necesară modificării poziției și condițiilor de presiune ale unei **unități de masă** în câmp gravitațional.

Exprimat pentru această unitate de **masă** potențialul curgerii este:

$$\Phi_M = \frac{P}{\rho_{apa}} - g \cdot z \quad (3.173)$$

în care

P - presiunea apei din pori (**Fig.3.58**):



- **negativă** în zona nesaturată (z.pendulară+z.funiculară+z.capilară);

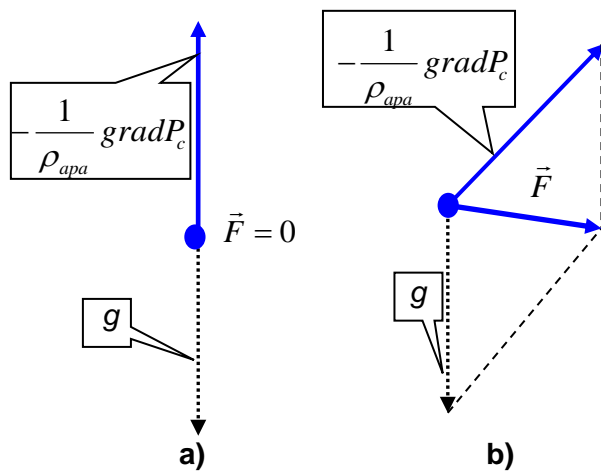
$$P = P_c = -\frac{2\sigma}{R} \quad (3.174)$$

- **pozitivă** sub nivelul piezometric (în acvifer):

$$P = \rho_{apa} \cdot g \cdot h \quad (3.175)$$

ρ_{apa} - densitatea apei;
 g - accelerația gravitațională;
 z - cota măsurată față de un reper standard (ex.: nivelul mării).

Fig.3.58. Variația presiunii apei din pori în funcție de gradul de saturație cu apă al porilor



Apa subterană se deplasează din zone cu potențial mare ($\Phi + \Delta\Phi$) spre zone cu potențial scăzut (Φ), sub acțiunea unei **forțe** (\vec{F}) orientată perpendicular pe **suprafețele de potențial constant (suprafețe echipotențiale)**:

$$\vec{F} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta n} = g - \frac{1}{\rho_{apa}} gradP_c \quad (3.176)$$

Rezultă că într-un punct de **masă unitară** acționează asupra unui **fluid**:

- accelerația gravitațională;
- gradientul de presiune împărțit prin **densitate** (cu "minus").

$$\vec{F} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta n} = g - \frac{1}{\rho_{fluid}} gradP_c \quad (3.177)$$

Dacă gradientul de presiune este orientat vertical, **forța rezultantă** (\vec{F}) este nulă și apa nu se deplasează (**Fig.3.59a**).

Pentru orice altă orientare a gradientului de presiune, orientarea și valoarea forței rezultante se determină prin regula de compunere a vectorilor (**Fig.3.59b**).

Când simultan cu apa se deplasează și fluide imiscibile, cele mai **ușoare** (**fu**) decât apa vor tinde să se **ridice** (**Fig.3.60a**) iar cele mai **grele** (**fg**) decât apa să **coboare** (**Fig.3.60b**), în raport cu direcția de curgere a apei.

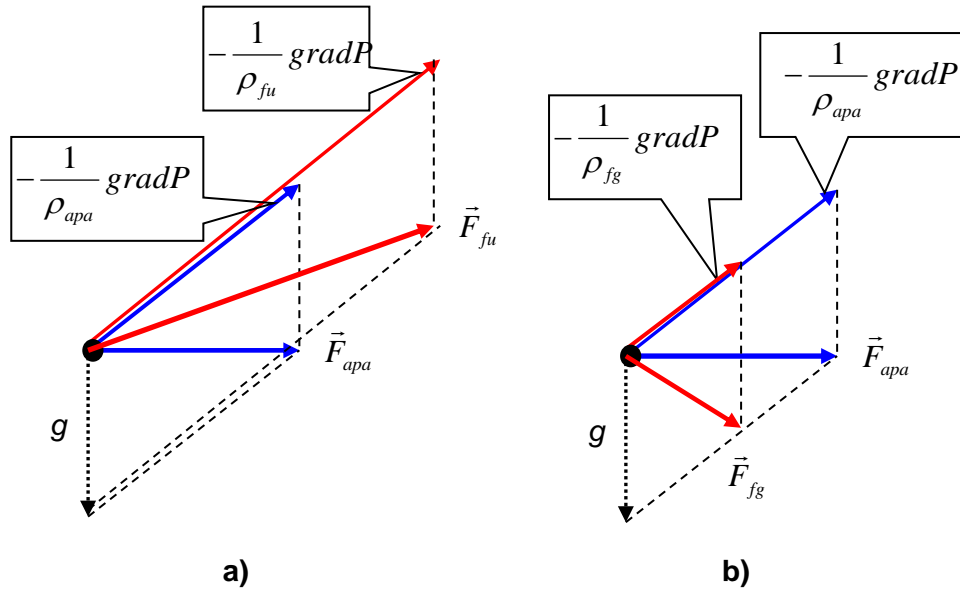


Fig.3.60. Componentele forțelor care acționează asupra **fluidelor mai ușoare** decât apa (**fu**) și **mai grele** decât apa (**fg**) în același câmp potențial.

Potențialul fluidelor se manifestă în piezometre prin **cota** la care este identificat nivelul fluidelor (\equiv sarcina piezometrică a fluidului: H_f):

$$\Phi_f = g \cdot H_f \quad (3.178)$$

Deoarece potențialul apei este:

$$\Phi_{apa} = gz + \frac{P}{\rho_{apa}} = g \cdot H_{apa} \quad (3.179)$$

iar al unui **fluid** oarecare:

$$\Phi_f = gz + \frac{P}{\rho_f} = g \cdot H_f \quad (3.180)$$

potențialul fluidului **f** în raport cu cel al **apei** poate fi exprimat sub forma:

$$\Phi_f = \frac{\rho_{apa}}{\rho_f} \Phi_{apa} - \frac{\rho_{apa} - \rho_f}{\rho_f} gz \quad (3.181)$$

iar sarcina piezometrică (cota):

$$H_f = \frac{\rho_{apa}}{\rho_f} H_f - \frac{\rho_{apa} - \rho_f}{\rho_f} z \quad (3.182)$$

Pentru trei piezometre cu aceeași presiune la partea inferioară a filtrului (P), umplute cu **apă**, fluid imiscibil mai ușor decât apa (fu) și fluid imiscibil mai greu decât apa (fg) (**Fig.3.61**):

- cota nivelului piezometric a fluidului mai ușor decât apa (H_{fu}) este mai mare decât cota nivelului piezometric din piezometrul umplut cu apă (H_{apa} ; $H_{fu} > H_{apa}$)
- cota nivelului piezometric a fluidului mai greu decât apa (H_{fg}) este mai mică decât cota nivelului piezometric din piezometrul umplut cu apă (H_{apa} ; $H_{fg} < H_{apa}$).

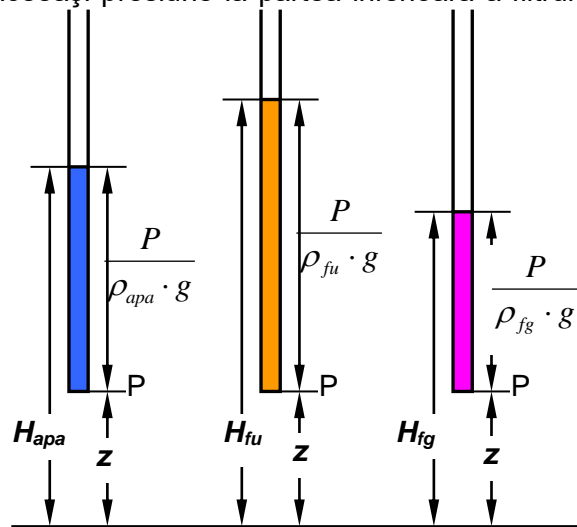


Fig.3.61. Sarcina piezometrică în trei piezometre: cu apă, fluid imiscibil mai ușor ca apa (fu) și fluid imiscibil mai greu ca apa (fg).

Corecțiile cotei nivelului piezometric în funcție de **densitatea fluidelor** din piezometre asigură corectitudinea hărților piezometrice pentru curgerile polifazice.

3.4.2.1. Fluide imiscibile mai ușoare decât apa

Fluidele imiscibile și mai ușoare decât apa (fu : gazolina, motorina etc.), sub acțiunea potențialului de care dispun migrează vertical în zona vadoasă traversând (**Fig.3.58**):

- **zona pendulară**, în care saturația în apă este sub cea ireductibilă (S_{ia});
- **zona funiculară**, în care saturația în apă este mai mare decât cea ireductibilă.

Dacă există o cantitate suficientă care să asigure depășirea saturației reziduale (S_{rp} în **Fig.3.55**), fluidele imiscibile se **acumulează** la partea superioară a **zonei capilare**.

Formarea acumulării de fluid

Traversarea zonei vadoase, în prezența apei și a aerului (**Fig.3.62a**), sub acțiunea potențialului disponibil are **trei etape** distincte:

- apariția unei **concentrații mari** de fluid (fu) la partea superioară a zonei vadoase, acolo unde acesta a fost deversat (**Fig.3.62b**);
- **distribuția** fluidului (fu) pe toată grosimea zonei vadoase, la o concentrație aproximativ constantă, sub acțiunea unei presiuni capilare (negative) care îl ține “sub tensiune” (**Fig.3.62c**);

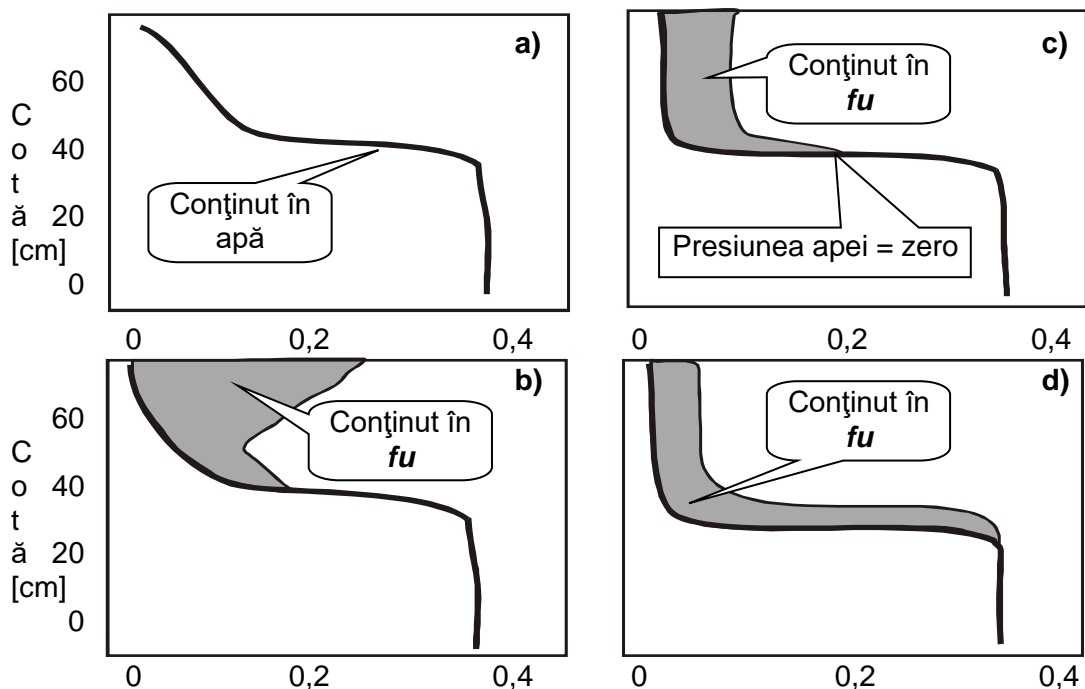


Fig.3.62. Modificarea în timp a distribuției fluidelor (f_u) în zona vadoasă

- **acumularea** fluidului (f_u) în partea superioară a zonei capilare conducând la apariția unui strat mobil cu **presiunea în pori pozitivă**. În această situație, zona capilară se subțiază, eventual dispare și fluidul (f_u) stă direct pe nivelul hidrostatic al acviferului. În zona centrală a acumulării de fluid ușor (f_u), **nivelul piezometric al acviferului poate avea o coborâre** locală (Fig.3.62d). Tot în această etapă o parte din fluid (f_u) se poate dizolva în apă și este antrenat de curgerea acviferului.

La finalul celei de-a treia etape, distribuția fluidului (f_u) poate fi regăsită în trei componente (Fig.3.63):

- **fluidul rezidual** din zona vadoasă;
- **fluidul mobil** din zona capilară și partea superioară a acviferului;
- **fluidul dizolvat** în acvifer și antrenat de curgerea acviferului.

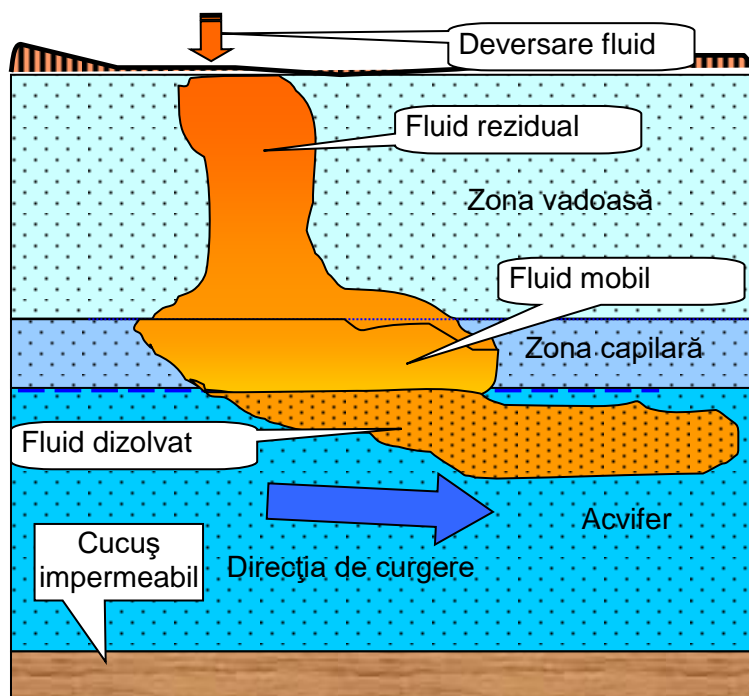


Fig.3.63. Distribuția pe verticală a celor trei componente ale fluidelor imiscibile mai ușoare decât apa (f_u).

Determinarea grosimii stratului de fluid acumulat

Grosimea stratului de fluid imiscibil mai ușor decât apa (**fu**) se determină pe baza măsurătorilor realizate în piezometre și a determinărilor de laborator. Complexitatea distribuției pe verticală a fluidelor imiscibile mai ușoare decât apa necesită măsurători riguroase, determinări de laborator și prelucrări laborioase.

Fluidul imiscibil este identificat în piezometru numai dacă este depășită saturația reziduală. Dacă această saturație este depășită și însumată cu cea a apei sarează complet porii formațiunii permeabile, fluidul poate deveni mobil și migrează lateral în piezometru.

Datorita prezenței zonelor capilare (**Fig.3.64**) piezometrele trebuie să aibă partea superioară a filtrelor deasupra limitei superioare a stratului de fluid.

Datele necesare estimării distribuției pe verticală a fluidului imiscibil în acvifer și a volumului existent pe unitatea de suprafață sunt:

- adâncimea limitei aer-fluid (**fu**) măsurată în piezometru (Ap_2 , **Fig.3.64**);
- adâncimea limitei apă-fluid (**fu**) măsurată în piezometru (Ap_1 , **Fig.3.64**);
- densitatea fluidului (**fu**) determinată în laborator (ρ_{fu});
- densitatea apei determinată în laborator (ρ_{apa});
- porozitatea (n) determinată în laborator;
- indicele de distribuție al porilor (λ ; Brooks&Corey) determinat în laborator;
- presiunea de dislocuire aer-fluid (P_d^{aer-fu} ; Brooks&Corey);
- presiunea de dislocuire apă-fluid (P_d^{fu-apa} ; Brooks&Corey);
- gradul de saturație în apă (S_{apa});
- gradul de saturație în fluid (**fu**) (S_{fu});
- saturația ireductibilă a apei (S_{i-apa});
- saturația reziduală a fluidului (S_{r-fu}).

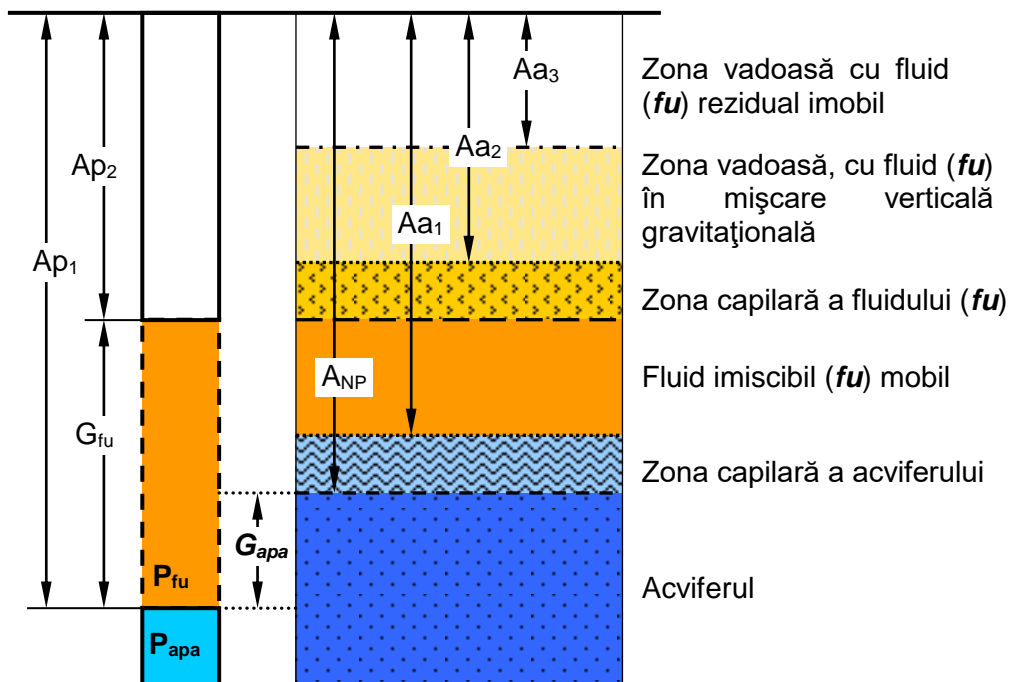


Fig.3.64. Distribuția fluidului imiscibil mai ușor decât apa (**fu**) în acvifer și în piezometrul de monitorizare

După migrarea fluidului în piezometru, limita apă-fluid coboară în piezometru sub adâncimea acestei limite din acvifer datorită greutatea acestuia. Din acest motiv grosimea stratului de fluid imiscibil din piezometru este mai mare decât cea din acvifer. Acest efect este mai mare atunci când grosimea stratului de fluid imiscibil este mică iar a zonei capilare este mare decât atunci când grosimea stratului de fluid este mare, zona capilară putând să fie foarte subțire sau să lipsească. Efectul este accentuat în formațiuni cu granulație fină.

Adâncimea sub nivelul apei din acvifer la care fluidul imiscibil ajunge la echilibru în piezometru (G_{apa}) poate fi calculată. La interfața apă-fluid, în piezometru, presiunea fluidului (P_{fu}) este egală cu presiunea apei (P_{apa}):

$$P_{fu} = P_{apa} \quad (3.183)$$

Ținând seamă că:

$$P_{fu} = \rho_{fu} \cdot G_{fu} \quad (3.184)$$

și

$$P_{apa} = \rho_{apa} \cdot G_{apa}, \quad (3.185)$$

rezultă că

$$G_{apa} = \frac{\rho_{fu}}{\rho_{apa}} \cdot G_{fu} \quad (3.186)$$

Adâncimea la care se află nivelul piezometric în acvifer se calculează cu:

$$A_{NP} = Ap_1 - G_{apa} = Ap_1 - \frac{\rho_{fu}}{\rho_{apa}} \cdot G_{fu} = Ap_1 - \frac{\rho_{fu}}{\rho_{apa}} (Ap_1 - Ap_2) \quad (3.187)$$

Pentru estimarea volumului de fluid imiscibil (fu) recuperabil există două metode (Farr, Houghtalen and McWorter, 1990 și Lenhard și Parker, 1990) bazate pe distribuția pe verticală a acestuia identificată pe baza piezometrelor de monitorizare. Cele două metode se diferențiază prin parametrii utilizați: parametrii lui Brooks&Corey sau parametrii van Ghenuchten.

Estimarea volumului de fluid imiscibil (fu) recuperabil (V_{fu}) din zona identificată prin piezometrele de monitorizare presupune detalierea distribuției pe verticală a fluidului și

Adâncimea limitei inferioare a acumulării de fluid imiscibil (Aa_1) și a limitei superioare a zonei capilare fluidului (Aa_2) se calculează pe baza măsurătorilor executate în piezometru și a presiunii de dislocuire a fluidului (P_d^{aer-fu} , P_d^{apa-fu}), utilizându-se formulele:

$$Aa_1 = Ap_1 - \frac{P_d^{apa-fu}}{(\rho_{apa} - \rho_{fu}) \cdot g} = Ap_2 + G_{fu} - \frac{P_d^{apa-fu}}{(\rho_{apa} - \rho_{fu}) \cdot g} \quad (3.188)$$

$$Aa_2 = Ap_2 - \frac{P_d^{aer-fluid}}{\rho_{fu} \cdot g} \quad (3.189)$$

Dacă presiunea din pori este pozitivă și există fluid imiscibil (**fu**) în piezometru atunci $Aa_1 > Ap_2$ iar din (3.117) rezultă că **grosimea minimă a stratului de fluid este:**

$$G_{fu} \geq \frac{P_d^{apa-fu}}{(\rho_{apa} - \rho_{fu}) \cdot g} \quad (3.190)$$

Efectul oscilației nivelului piezometric al acviferului

Oscilațiile nivelului piezometric al acviferului modifică distribuția pe verticală a **fluidului rezidual** și a **fluidului mobil** (Fig.3.65a):

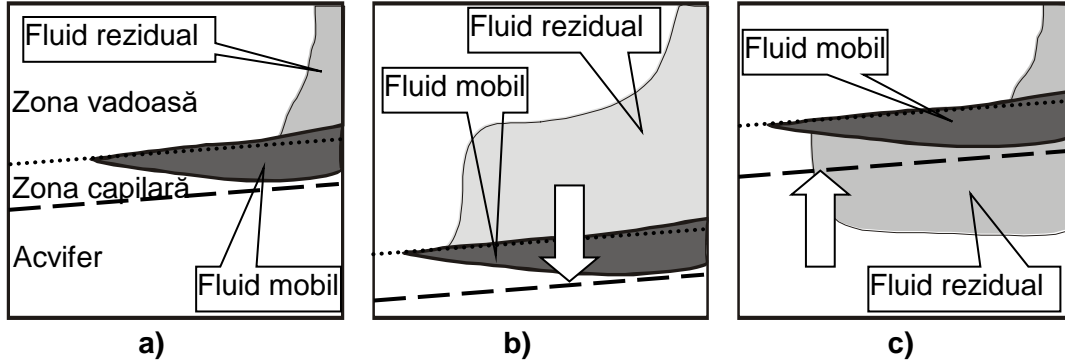


Fig.3.65. Efectul oscilației nivelului piezometric al acviferului asupra distribuției fluidului imiscibil mai ușor decât apa (**fu**).

- dacă nivelul piezometric coboară (Fig.3.65b), fluidul mobil coboară o dată cu el, având loc în același timp o extindere pe verticală a zonei cu fluid rezidual din zona vadoasă;
- dacă nivelul piezometric urcă (Fig.3.65c), fluidul mobil urcă și el iar zona cu fluid rezidual rămâne sub acesta. În situația în care nivelul piezometric al acviferului urcă mai repede decât poate urca fluidul mobil, acesta se regăsește, pentru o anumită perioadă de timp, sub formă de pungi sub nivelul piezometric al acviferului.

Calcul volumului de fluid recuperabil

Volumul total de fluid imiscibil nerezidual (**fu**) din zona vadoasă se evaluează utilizând **parametrii Brooks&Corey** cu:

$$V_{fu} = n \left\{ \int_{Aa_3}^{Aa_1} (1 - S_{apa}) dz - \int_{Aa_3}^{Aa_2} [1 - (S_{apa} + S_{fu})] dz \right\} \quad (3.191)$$

în care

$$S_{fu} - S_{apa} = (1 - S_{i-apa}) \left(\frac{P_c^{aer-fu}}{P_d^{aer-fu}} \right)^{-\lambda} + S_{i-apa}, \quad P_c^{aer-fu} > P_d^{aer-fu} \quad (3.192)$$

$$S_{fu} + S_{apa} = 1, \quad P_c^{aer-fu} < P_d^{aer-fu} \quad (3.193)$$

$$S_{apa} = (1 - S_{i-apa}) \left(\frac{P_c^{fu-apa}}{P_d^{fu-apa}} \right)^{-\lambda} + S_{i-apa}, \quad P_c^{fu-apa} > P_d^{fu-apa} \quad (3.194)$$

$$S_{apa} = 1, P_c^{fu-apa} < P_d^{fu-apa} \quad (3.195)$$

cu presiunile:

$$P_c^{aer-fu} = \rho_{fu} \cdot g \left[Ap_2 - \left(\frac{P_d^{aer-fu}}{\rho_{fu} \cdot g} \right) - z \right] + P_d^{aer-fu} \quad (3.196)$$

$$P_c^{fu-apa} = (\rho_{apa} - \rho_{fu}) \left[Ap_1 - \frac{P_d^{fu-apa}}{(\rho_{apa} - \rho_{fu}) \cdot g} - z \right] + P_d^{fu-apa} \quad (3.197)$$

Integrarea ecuației (3.161) pentru $Aa_3 > 0$, utilizând ecuațiile (3.162)-(3.167) conduce la:

$$V_{fu} = \frac{n(1-S_{i-apa}) \cdot A}{1-\lambda} \left[\lambda + (1-\lambda) \left(\frac{G_{fu}}{A} \right) - \left(\frac{G_{fu}}{A} \right)^{1-\lambda} \right] \quad \text{pentru } \lambda \neq 1 \quad (3.198)$$

sau

$$V_{fu} = n(1-S_{i-apa}) \left[1 - A \cdot (1 + \ln G_{fu}) \right] \quad \text{pentru } \lambda = 1 \quad (3.199)$$

în care

$$A = \frac{P_d^{fu-apa}}{(\rho_{apa} - \rho_{fu}) \cdot g} - \frac{P_d^{aer-fu}}{\rho_{fu} \cdot g} \quad (3.200)$$

și

$$G_{fu} = Ap_1 - Ap_2 \geq \frac{P_d^{fu-apa}}{(\rho_{apa} - \rho_{fu}) \cdot g} \quad (3.201)$$

Dacă gradul de saturație al fluidului imiscibil este peste cel rezidual ($Aa_3 = 0$) atunci integrarea ecuației (3.161) conduce la:

- pentru $\lambda \neq 1$

$$V_{fu} = n(1-S_{i-apa}) \left\{ (G_{fu} - A) - \frac{P_d^{aer-fu}}{\rho_{fu} \cdot g(1-\lambda)} \left[1 - \left(\frac{\rho_{fu} \cdot g \cdot Ap_2}{P_d^{aer-fu}} \right)^{1-\lambda} \right] \right\} +$$

$$+ n(1-S_{i-apa}) \left\{ \frac{P_d^{fu-apa}}{(\rho_{apa} - \rho_{fu}) \cdot g \cdot (1-\lambda)} \left[1 - \left(\frac{(\rho_{apa} - \rho_{fu}) \cdot g \cdot Ap_1}{P_d^{fu-apa}} \right)^{1-\lambda} \right] \right\} \quad (3.202)$$

- pentru $\lambda = 1$

$$V_{fu} = n(1-S_{i-apa}) \left[(G_{fu} - A) - \frac{P_d^{fu-apa}}{(\rho_{apa} - \rho_{fu})} \ln Ap_1 + \frac{P_d^{fu-aer}}{\rho_{fu} \cdot g} \ln Ap_2 \right] \quad (3.203)$$

Metoda bazată pe **parametrii van Ghenuchten** este mai rar utilizată deoarece fiind neliniară presupune o rezolvare numerică. La această metodă se recurge numai când **stratul de fluid imiscibil este foarte subțire**, situație în care se pare că această metodă este mai precisă decât cea bazată pe parametrii Brooks&Corey.

Fluidul imiscibil (**fu**: gazolină, motorină etc.) poate fi recuperat prin foraje sau tranșee de decantare. O parte considerabilă rămâne în zona vadoasă sub formă reziduală. Partea volatilă poate fi recuperată prin sistem de evaporare din sol.

Cantitatea rămasă în zona vadoasă depinde de proprietățile fluidului și ale formațiunii permeabile în care a fost deversat. Din estimările realizate (Testa și Paczkowski, 1989) rezultă capacități de retenție pentru petrol:

- pietriș: 5 litri/m³;
- silt : 40 litri/m³.

O parte din fluidele reținute în sol sunt supuse proceselor de degradare biologică, degradare activată de prezența oxigenului.

3.4.2.2. Fluide imiscibile mai grele decât apa

Fluidele imiscibile și mai grele decât apa (**fg**: tricloroetilena, pentaclorofenol etc.), sub acțiunea potențialului de care dispun traversează (**Fig.3.66**):

- **zona vadoasă**, nesaturată cu apă;
- **zona capilară**, saturată cu apă;
- **zona saturată (acviferul)**, dacă fluidul (**fg**) este în cantitate suficientă pentru a învinge presiunea capilară din zona capilară.

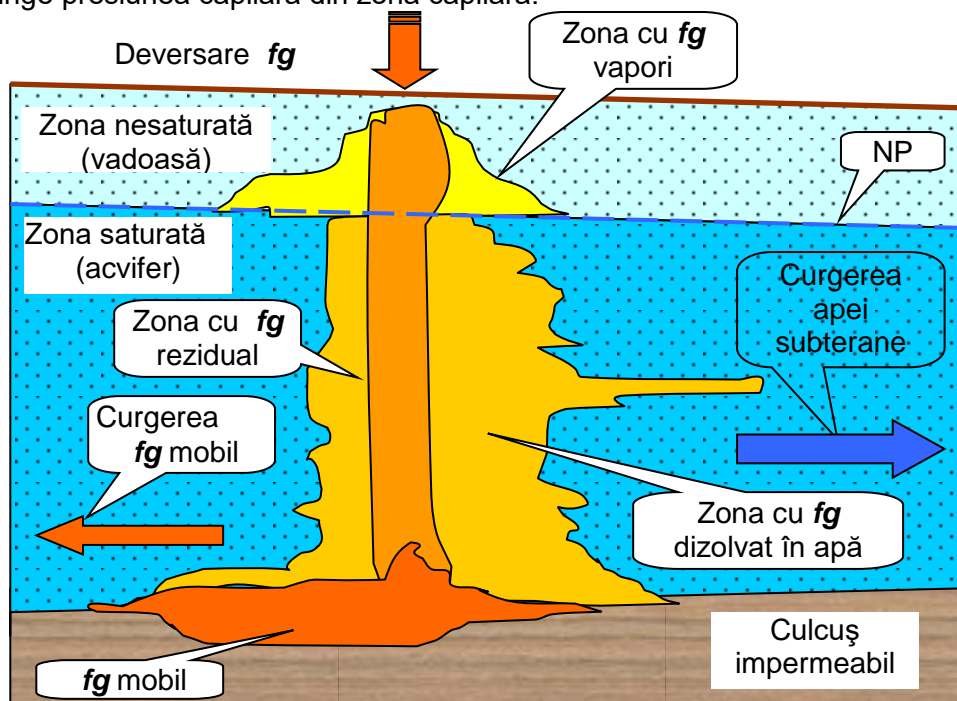


Fig.3.66. Distribuția fluidului imiscibil mai greu decât apa (**fg**) în zona vadoasă și în acvifer.

Dacă există o cantitate suficientă de fluid (**fg**), acesta ajunge pe **culcușul impermeabil** al acviferului unde se poate acumula în zonele de depresionare sau se deplasează în funcție de morfologia acestuia și dinamica acviferului.

Formarea acumulării de fluid

Acumularea de fluid imiscibil mai greu decât apa (**fg**), pe culcușul impermeabil al acviferului presupune traversarea pe verticală, sub acțiune gravitațională a **zonei vadoase**, proces care se declanșează o dată ce este depășită **saturația reziduală**.

Fluidul imiscibil (**fg**) se deplasează prin porii mari care sunt umpluți parțial cu apă și parțial cu aer. Aerul și o parte din apă sunt dislocuite de **fg**. Permeabilitatea zonei vadoase pentru **fg** este mai mare decât pentru apă deoarece **fg** circulă prin porii mai mari fiind un fluid care nu udă granulele solide ($\alpha > 90^\circ$).

Când **fg** ajunge la **zona capilară**, toți porii sunt umpluți cu apă și începe dislocuirea acesteia, proces care se continuă și în acvifer (sub nivelul piezometric al acestuia până la culcușul impermeabil).

Dacă acviferul **nu are dinamică**, deplasarea **fg** continuă pe **verticală** sub acțiunea **gravitației**. Pentru dislocuirea apei din porii, înălțimea minimă a coloanei de fluid imiscibil (h_0) poate fi evaluată cu formula lui Hobson:

$$h_0 = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha \left(\frac{1}{r_t} - \frac{1}{r_p} \right)}{g \cdot (\rho_{apa} - \rho_{fg})} \quad (3.204)$$

în care

α - unghiul de contact între faze;

σ - tensiunea interfacială între cele două fluide (apa și **fg**);

r_p - raza medie a porilor ;

r_t - raza porilor mici care unesc porii mari dintr-o formațiune granulară

Pentru o formațiune granulară bine sortată, formată din granule cu diametrul d , cu un sistem **romboedric** de așezare a granulelor, cele două raze pot fi estimate cu relațiile:

$$r_p = 0,212 \cdot d \quad (3.205)$$

$$r_t = 0,077 \cdot d \quad (3.206)$$

ρ_{apa} - densitatea apei;

ρ_{fg} - densitatea fluidului imiscibil mai greu decât apa (**fg**);

g - accelerația gravitațională.

Dacă este suficient fluid **fg** pentru a învinge presiunea capilară acesta continuă să se deplaseze pe verticală sub acțiunea gravitației până ajunge la un strat în care porii sunt așa de mici încât nu mai poate învinge presiunea capilară a apei din porii. La nivelul respectiv se acumulează un strat de fluid **fg**.

Determinarea grosimii stratului de fluid acumulat

Piezometrele utilizate pentru determinarea distribuției fluidelor imiscibile **fg** trebuie executate **exact până la adâncimea culcușului impermeabil** al acviferelor (piezometrul **B**, **Fig.3.67**).

Fluidul imiscibil **fg mobil** și **apa mobilă** vor intra în piezometru unde după un timp se vor separa: **fg** la partea inferioară și **apa** la partea superioară.

Limita apă fluid **fg** va fi în piezometru la o adâncime mai mare decât în acvifer. Diferența de adâncime (Δ_{apa_fg}) depinde de gradul de saturație al

formațiunii cu **fg**. Cu cât gradul de saturație în **fg** este mai mic, diferența dintre cele două niveluri va fi mai mare.

Dacă piezometrul este executat până la o adâncime mai mare decât cea a culcușului impermeabil (piezometrul A), **fg** mobil va umple piezometrul sub adâncimea stratului impermeabil și grosimea stratului de **fg** măsurată în piezometru va fi supraestimată.

Distribuția pe verticală a **fg** și a apei depinde în mare măsură de granulozitatea formațiunilor, reflectată direct în permeabilitatea acestora:

- la o **permeabilitate redusă** (granulozitate fină, pori mici) grosimea zonei cu **fg mobil** și **apa ireductibilă** va fi mai **mică** decât a zonei în care și **apa** și **fg** sunt mobile;
- la o **permeabilitate mare** (compoziție granulometrică grosieră, pori mari) grosimea zonei cu **fg mobil** și **apă ireductibilă** va fi mai **mare** decât a zonei în care și **apa** și **fg** sunt mobile;

Atunci când cantitatea de fluid imiscibil **fg** nu este suficientă pentru a depăși gradul de saturație reziduală poluarea apei subterane se produce prin intermediul fazei gazoase (vapori). Dacă **fg** este volatil vaporii difuzează în zona vadoasă și se

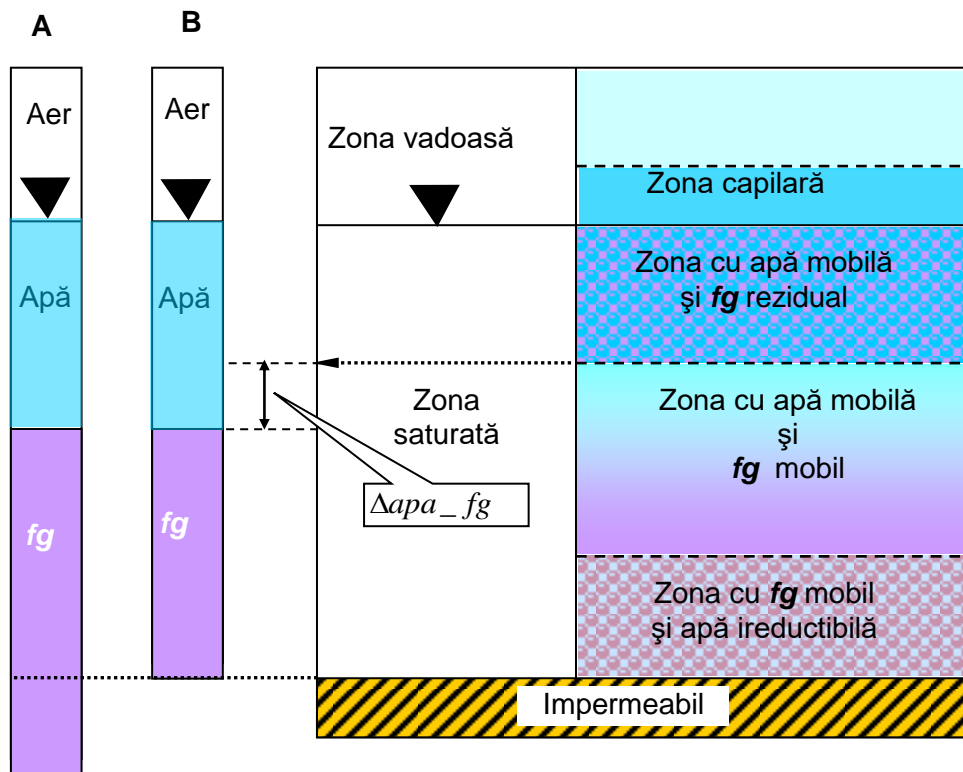


Fig.3.67. Zonele cu distribuția fluidului imiscibil mai greu decât apa (**fg**) în două piezometre de monitoring (A și B)

dizolvă în apa din pori prin intermediul căreia pot ajunge în zona saturată.

Deplasarea fluidului **fg** în zona saturată

Acumularea fluidelor imiscibile mai grele decât apa (**fg**) pe culcușul acviferelor este condiționată pe întreaga grosime a acviferului de dinamica apei subterane. În zona saturată fluidele **fg** se deplasează sub acțiunea forțelor

F_{fg} (Fig.3.59b) dacă există în **fază continuă**. În stare discontinuă, sub formă de picături, fluidele **fg** vor fi dislocuite din pori de apa subterană în direcția de curgere.

Gradientul de presiune lateral necesar pentru deplasarea **fg** din porii saturați se estimează cu relația (Villaume, 1985):

$$gradP = \frac{2\sigma}{L_0 \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_p} \right)} \quad (3.207)$$

în care

σ - tensiunea interfacială între cele două fluide (apa și **fg**);

r_p - raza medie a porilor ;

r_i - raza porilor mici care unesc porii mari dintr-o formațiune granulară

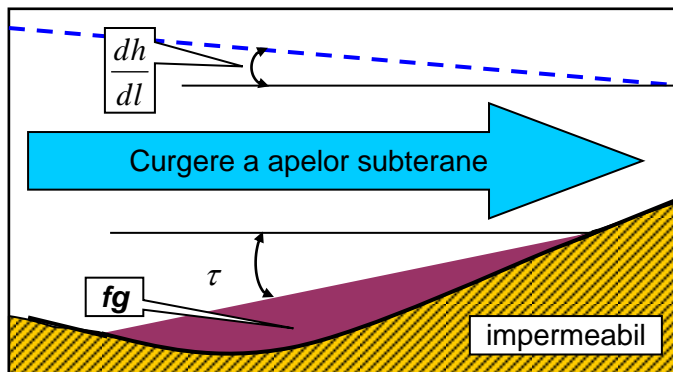
L_0 - lungimea zonei continue cu **fg** măsurată paralel cu direcția de curgere a apei subterane.

Conservarea acumulării de fluid **fg** în baza acviferului este condiționată de **morfologia culcușului** acviferului (pantele depresiunilor în care se acumulează **fg**) și **dinamica** (gradientul hidrolic) acestuia.

Fluidul **fg** acumulat în depresiunile culcușului acviferului se deplasează în josul pantelor acestora sub acțiunea gravitației chiar și în situația în care sensul de curgere al apei subterane este contrar pantei morfologice (pentru gradienti hidrolici mici !!!; Fig.3.68).

Interfața dintre apa subterană care curge și fluidul **fg** acumulat într-o depresiune (static !!!)

formează cu orizontala un unghi (τ) care poate fi evaluat cu relația (Hubbert, 1953):



$$\tau = \frac{\rho_{apa}}{\rho_{apa} - \rho_{fg}} \cdot \frac{dh}{dl} \quad (3.208)$$

Valoarea negativă a unghiului τ arată că panta suprafeței piezometrice și a interfeței apă-**fg** sunt de semn diferit (situația ilustrată în Fig.3.68).

Fig. 3.68 Panta interfeței dintre o acumulare de **fg** și apa subterană în mișcare.

Deplasarea fluidelor **fg** în zona saturată complică monitorizarea distribuției acestora pe **verticală** și pe **orizontală**.