

# Ce înseamnă, de fapt, stocarea geologică a CO<sub>2</sub>?

O utilizare  
responsabilă  
a combustibililor fosili

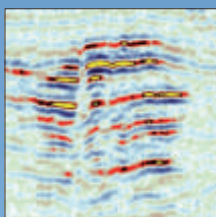
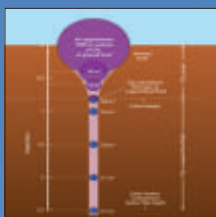
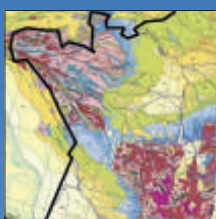
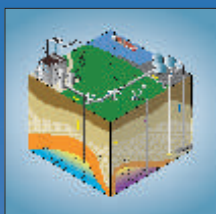
Stoparea  
sursei principale  
de gaze cu efect de seră

Reintroducerea  
carbonului  
înapoi în pământ

Câștigarea timpului necesar pentru  
dezvoltarea surselor energetice,  
care să nu afecteze clima terestră



Rețeaua Europeană de Excelență CO<sub>2</sub>GeoNet



|   |           |
|---|-----------|
| <b>Schimbarile climatice<br/>si necesitatea<br/>stocarii geologice a CO<sub>2</sub></b> .....   | <b>4</b>  |
| <b>1. Unde<br/>si cât de mult CO<sub>2</sub><br/>putem stoca în subsol?</b> .....   | <b>6</b>  |
| <b>2. Cum putem<br/>transporta si injecta<br/>cantitati mari de CO<sub>2</sub>?</b> .....   | <b>8</b>  |
| <b>3. Ce se întâmpla<br/>cu CO<sub>2</sub> odata ajuns<br/>în rezervorul de stocare?</b> .....  | <b>10</b> |
| <b>4. Poate CO<sub>2</sub> sa se scurga<br/>în afara rezervorului<br/>si daca se întâmpla aceasta,<br/>care ar putea fi consecintele?</b> ..... | <b>11</b> |
| <b>5. Cum poate fi monitorizata<br/>la adâncime si la suprafata<br/>o locatie de stocare?</b> .....   | <b>14</b> |
| <b>6. Ce criterii de siguranta<br/>trebuie impuse si respectate?</b> .....  | <b>16</b> |
| <b>Glosar</b> .....   | <b>18</b> |
| <b>Ce poate face CO<sub>2</sub>GeoNet pentru dumneavoastra</b> .....  | <b>19</b> |

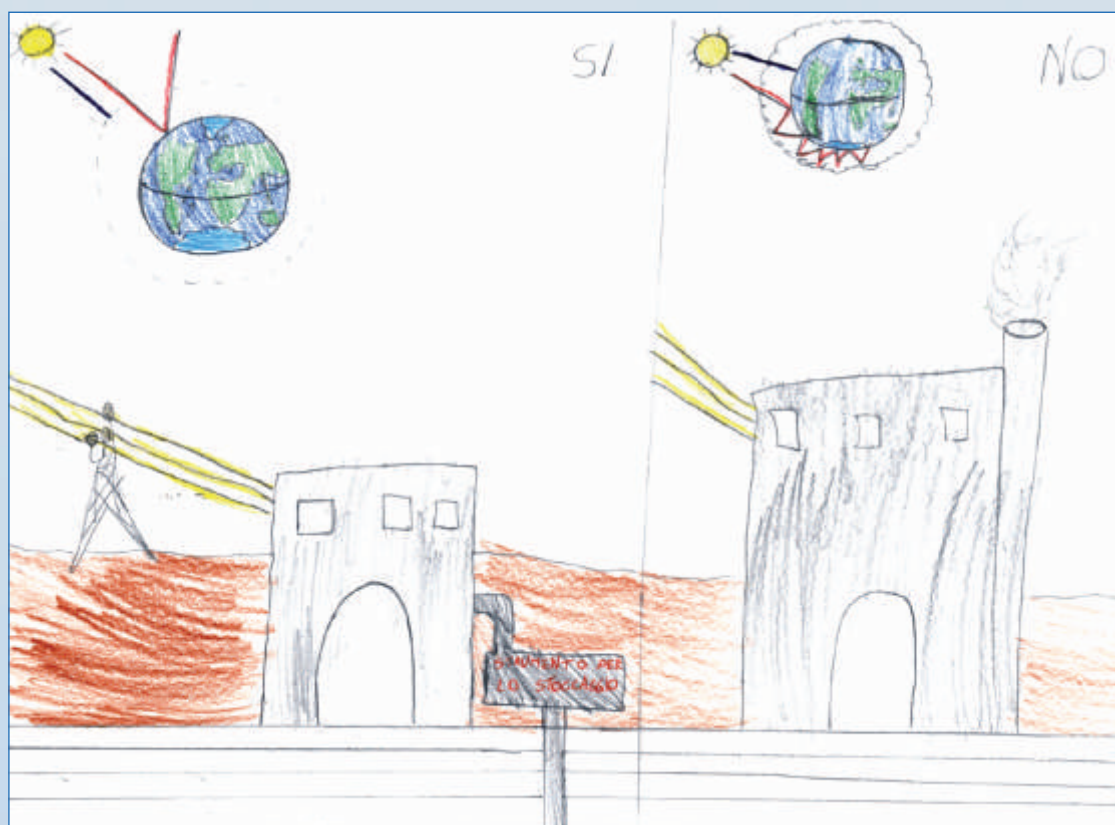
Această bro ură a fost realizată prin contribu ia următorilor:

Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijs Remmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias.

Traducerea i adaptarea în limba română: Amuliu Proca, Constantin tefan Sava i Alexandra Dudu.

# O viziune asupra viitorului

**Fără coșuri de fum**  
**O conductă transportă CO<sub>2</sub> și îl injectează în pământ**  
**Asta face bine Pământului**



Massimo, 10 ani, Roma - Italia

**Pentru copiii noștri**  
**stocarea geologică a CO<sub>2</sub> este un lucru bun**

# Schimbările climatice i necesitatea stocării geologice a CO<sub>2</sub>

**Figura 1**  
Emisiile globale de CO<sub>2</sub> legate de activitățile umane ajung la 30 de miliarde de tone (Gt) pe an, ceea ce corespunde la 8,1 Gt de carbon: 6,5 Gt din arderea combustibililor fosili și 1,6 Gt din defrișări și practici agricole.

## Omenirea elimină în atmosferă prea mult CO<sub>2</sub>

Acum se acceptă faptul că activitățile umane modifică ciclul planetar al carbonului. Înainte de revoluția industrială, în ultimii aproximativ 10.000 de ani, acest ciclu reglat extrem de precis, ce implică schimbul de carbon între geosferă, biosferă, oceane și atmosferă, a condus la concentrații modeste de CO<sub>2</sub> în atmosferă (în jur de 280 ppm, adică 0,028%).

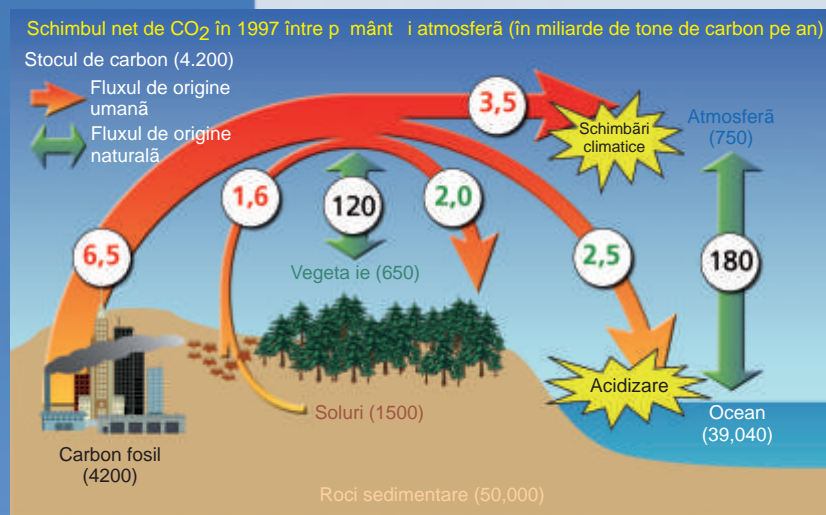
Totuși, în ultimii 250 de ani, arderea prolifică a combustibililor fosili (cărbune, petrol, gaze) pentru necesități energetice - încălzire și transport - a condus la creșterea continuă a cantității de CO<sub>2</sub> emisă în atmosferă (Fig. 1). Aproximativ jumătate din acest exces, indus de omenire, a fost reabsorbit de vegetație și dizolvat în oceane, excesul respectiv cauzând acidizarea oceanelor și impactul negativ asociat asupra plantelor și animalelor. Restul s-a acumulat în atmosferă unde contribuie la modificările climatice deoarece CO<sub>2</sub> este un gaz cu efect de seră ce reține o parte din căldura solară conducând la încălzirea suprafeței pământului. Sunt necesare acțiuni imediate și urgente pentru a se opri, în deceniile următoare, creșterea de CO<sub>2</sub> din atmosferă, care a ajuns la 387 ppm (deja o creștere de 38% față de nivelurile preindustriale) să treacă dincolo de nivelul critic de 450 ppm. Experții din lumea întreagă sunt de acord că deasupra acestui nivel nu mai este posibilă evitarea celor mai drastice consecințe.

## Reintroducerea carbonului în pământ

De la debutul Ereii Industriale, în 1750, lumea noastră a devenit extrem de dependentă de combustibilii fosili. De aceea nu este deloc surprinzător că transformarea societății noastre într-una bazată pe surse de energie prietenoase mediului va necesita timp și bani. Este necesară însă o soluție pe termen scurt, care să ne ajute să reducem dependența de combustibilii fosili prin utilizarea lor fără a polua, câștigând, astfel, timp pentru dezvoltarea tehnologiilor și infrastructurii pentru un viitor bazat pe energie regenerabilă. O astfel de opțiune este crearea unei bucle închise în sistemul de producere a energiei prin care cărbunele extras din pământ, sub formă de gaze, petrol sau cărbune, să fie reintrodus în pământ sub formă de CO<sub>2</sub>. Interesant de remarcat este faptul că stocarea subterană a CO<sub>2</sub> nu este o invenție a omenirii ci un fenomen în întregime natural, foarte răspândit sub formă de zăcăminte de CO<sub>2</sub> care au existat timp de mii sau milioane de ani. Un astfel de exemplu este seria de opt zăcăminte naturale de CO<sub>2</sub>, din partea de sud-est a Franței, descoperite în timpul explorărilor pentru petrol realizate în anii 1960 (Fig. 2). Acestea, precum și alte numeroase zăcăminte naturale din lumea întreagă, dovedesc faptul că formațiunile geologice pot stoca CO<sub>2</sub>, în mod eficient și sigur, pentru perioade de timp extrem de lungi.

## Captarea și stocarea CO<sub>2</sub>: o promițătoare cale de diminuare a intensității schimbărilor climatice

În ansamblul de măsuri care trebuie luate urgent pentru diminuarea intensității schimbărilor climatice și acidizării oceanelor, captarea și stocarea CO<sub>2</sub> (CCS\*)



**Figura 2**  
Provincia carbogazoasă a Franței



© BRGM.im@gé

© BRGM.im@gé

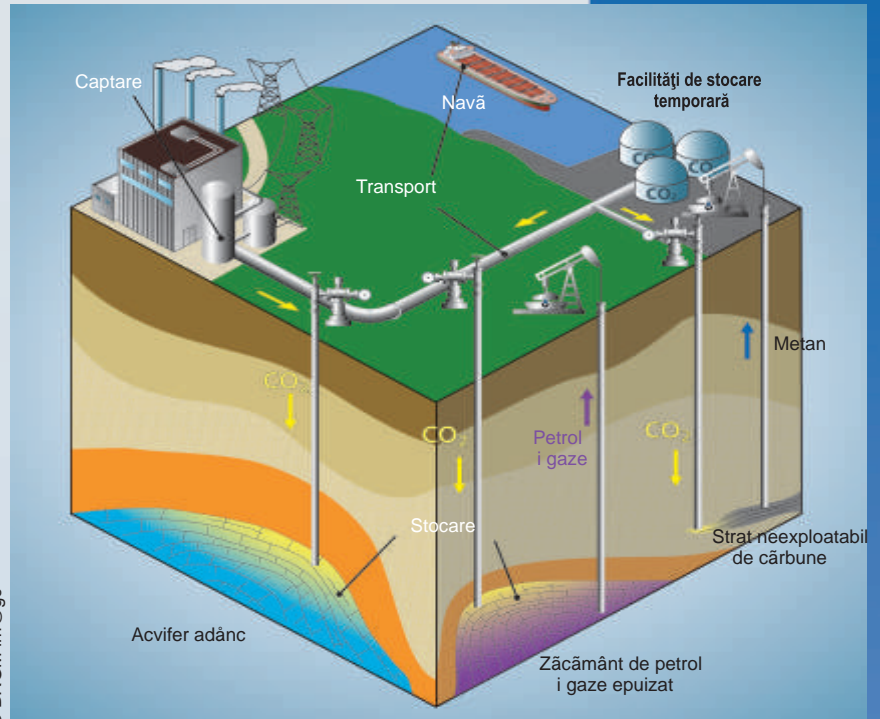
poate juca un rol decisiv deoarece ar putea contribui cu 33% din reducerea de CO<sub>2</sub> necesară până în anul 2050. CCS implică captarea CO<sub>2</sub> în centralele energetice ce ard gaze sau cărbune sau de la alte instalații industriale (oțelării, fabrici de ciment, rafinării etc). Transportul său se realizează prin conducte sau în nave până la locul de stocare și injectare, printr-un foraj\*, într-o formațiune geologică adecvată pentru stocarea pe termen lung (Fig. 3). Având în vedere continua creștere a populației planetei și creșterea cererii de energie în țările în curs de dezvoltare, precum și absența unor surse alternative de energie "curată" de scară mare, pe termen scurt este inevitabilă utilizarea combustibililor fosili. Mână în mână cu CCS umanitatea ar putea progresa pe o cale prietenoasă creând, în același timp, o punte spre o economie mondială bazată pe o producție durabilă de energie.

### CCS se dezvoltă rapid pe plan mondial

Începând cu anii 1990 au fost realizate programe majore de cercetare asupra CCS în Europa, Statele Unite, Canada, Australia și Japonia. Cunoștințele utile au fost obținute în cadrul unor proiecte demonstrative de scară mare în care a fost injectat CO<sub>2</sub> în subsol, timp de câțiva ani: Sleipner în Norvegia (circa 1 Mt/an începând din 1996) (Fig. 4), Weyburn în Canada (circa 1,8 Mt/an începând din 2000) și în Salah în Algeria (circa 1,8 Mt/an începând din 2004). Colaborarea internațională în domeniul cercetării stocării CO<sub>2</sub>, favorizată de IEA-GHG\* și CSLF\*, a fost deosebit de importantă pentru îmbunătățirea în elegerii acestora și pentru realizarea unei comunități științifice mondiale care este preocupată de această problemă. Un exemplu, excelent, îl reprezintă raportul special al IPCC\* referitor la captarea și stocarea (2005) care descrie stadiul actual al cunoștințelor și obstacolele ce trebuie depășite pentru a permite răspândirea pe scară largă a acestei tehnologii. Există, deja, o expertiză tehnică solidă iar lumea se îndreaptă acum, cu siguranță, spre faza demonstrativă. În plus progresele tehnologice și cadrul legislativ, de reglementare - economic și politic - este conturat, iar percepția și suportul social sunt în curs de evaluare. În Europa scopul este de a avea 12 proiecte demonstrative, de scară mare, în funcție până în 2015 pentru a permite trecerea în 2020, la faza comercială. În acest scop, Comisia Europeană a emis „Pachetul de acțiuni pentru acțiuni climatice și energii regenerabile” ce propune o Directivă asupra stocării geologice a CO<sub>2</sub>, precum și alte măsuri pentru promovarea dezvoltării CCS.

### Probleme cheie legate de stocarea geologică a CO<sub>2</sub>

Rețeaua de excelență CO<sub>2</sub>GeoNet a fost creată, sub auspiciile Comisiei Europene, ca un grup de instituții de cercetare capabil să mențină Europa în fruntea cercetării mondiale de scară largă. Unul dintre scopurile rețelei CO<sub>2</sub>GeoNet este comunicarea informațiilor științifice clare, referitoare la aspectele tehnice ale stocării geologice a CO<sub>2</sub>. Pentru a încuraja dialogul asupra

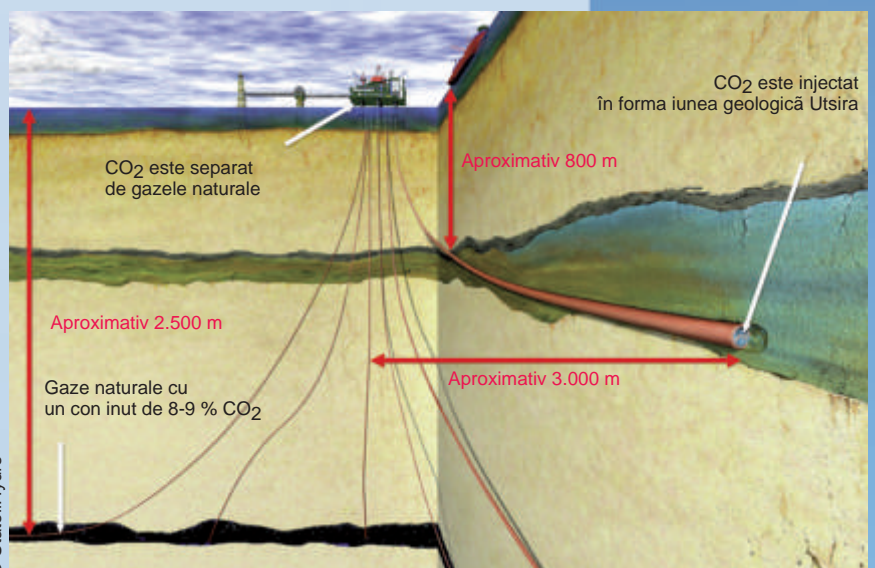


**Figura 3**  
La centralele energetice, CO<sub>2</sub> este captat prin separarea sa de alte gaze. Este apoi comprimat și transportat prin conducte sau nave la locația de stocare geologică: acvifere saline adânci, zăcămint de petrol sau gaze epuizate sau strate neexploatabile de cărbune.

aspectelor esențiale referitoare la această tehnologie de importanță vitală, cercetătorii CO<sub>2</sub>GeoNet au pregătit răspunsuri la câteva întrebări frecvent puse.

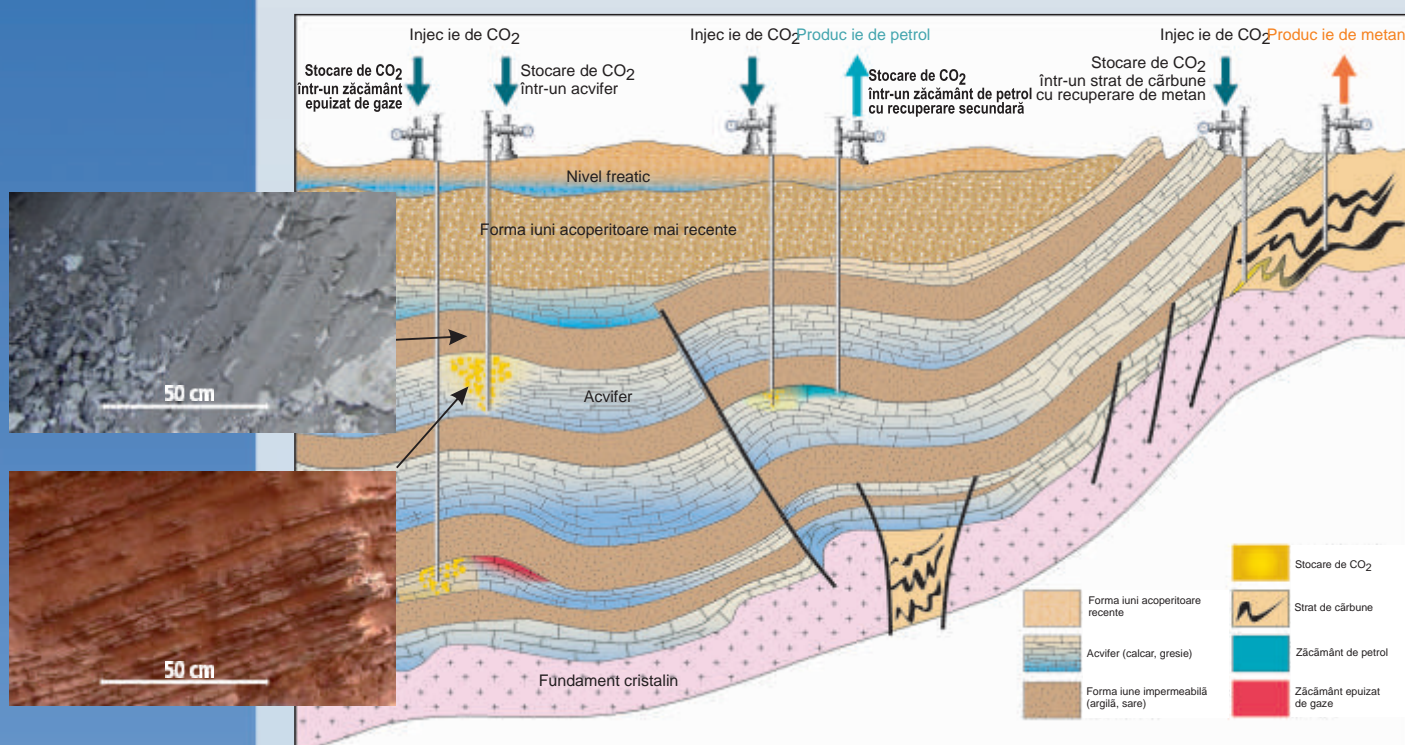
În paginile următoare veți găsi explicații asupra felului în care se poate face stocarea geologică a CO<sub>2</sub>, în ce circumstanțe și acest lucru este posibil și care sunt criteriile pentru aplicarea sa eficientă și sigură.

**Figura 4**  
Secțiune verticală a locației Sleipner din Norvegia. Gazele naturale extrase de la o adâncime de 2.500 m conțin câteva procente de CO<sub>2</sub> ce trebuie îndepărtate pentru a corespunde standardelor comerciale. În loc de a fi eliberat în atmosferă, CO<sub>2</sub> captat este injectat la adâncimea de aproximativ 1.000 m în acviferul formației geologice Utsira.



## Unde și cât de mult CO<sub>2</sub> putem stoca în subsol?

CO<sub>2</sub> nu poate fi stocat chiar oriunde în subsol; mai întâi trebuie identificate forma iunile geologice gazdă. Rezervoare potențiale pentru stocarea geologică a CO<sub>2</sub> există în multe locuri de pe pământ și oferă suficientă capacitate pentru a asigura o semnificativă diminuare a modificărilor climatice, induse de activitățile umane.



**Figura 1**  
CO<sub>2</sub> este injectat în strate geologice adânci de roci poroase și permeabile (gresii, în fereastra din stânga jos), acoperite de roci impermeabile (argile, în fereastra de sus) care împiedică CO<sub>2</sub> să migreze spre suprafață. Principalele opțiuni de stocare includ:  
1. Zăcăminte epuizate de petrol/gaze cu recuperare secundară acolo unde aceasta este posibilă;  
2. Acvifere ce conțin apă sărată ce nu poate fi utilizată pentru consum uman;  
3. Strate adânci neexploatabile de cărbune asociate local cu recuperarea secundară a metanului.

Există trei opțiuni principale pentru stocarea CO<sub>2</sub> (Fig. 1):

1. Zăcăminte epuizate de petrol și gaze naturale - cunoscute în detaliu în urma operațiilor de explorare și exploatare - oferă oportunități imediate pentru stocarea CO<sub>2</sub>.
2. Acvifere saline - oferă un potențial mare, dar sunt mai puțin cunoscute.
3. Strate de cărbune neexploatabile - este o opțiune pentru viitor când se va rezolva problema injectării unor mari cantități de CO<sub>2</sub> în cărbune cu permeabilitate\* redusă.

### Rezervoarele

Odată injectat în subsol, într-o rocă rezorv adecvată, CO<sub>2</sub> se acumulează în porii dintre granulele rocii sau în fracturi, dislocând, astfel, orice fluid preexistent cum ar fi gazele, apa sau petrolul. Rocile gazdă pentru stocarea geologică a CO<sub>2</sub> trebuie, deci, să aibă o porozitate\* și o permeabilitate ridicată. Astfel de roci, rezultat al depunerii sedimentelor în trecutul geologic, se găsesc, de obicei, în așa numitele „bazine sedimentare”. În anumite locuri, astfel de formațiuni alternează cu roci impermeabile, care acționează ca o protecție impenetrabilă.

Bazinele sedimentare găzduiesc, adeseori, zăcăminte de hidrocarburi și chiar de CO<sub>2</sub> natural, ce demonstrează capacitatea lor de reținere a fluidelor pentru o perioadă mare de timp deoarece au intrat în capcană, pentru milioane de ani petrol, gaze și chiar CO<sub>2</sub> pur.

În ilustrațiile ce arată diversele opțiuni de stocare a CO<sub>2</sub>, subsolul este, deseori, reprezentat ca o structură suprasimplificată de straturi omogene suprapuse. În realitate acesta este alcătuit din formațiuni de roci rezorv, permeabile și impermeabile, distribuite neuniform și uneori fracturate, ce alcătuiesc structuri complexe, heterogene. Pentru evaluarea gradului de adecvare a unei structuri propuse pentru stocarea subterană a CO<sub>2</sub> sunt necesare cunoștințele detaliate a locațiilor respective și o solidă experiență geotehnologică. Rezervoarele potențiale de CO<sub>2</sub> trebuie să satisfacă mai multe criterii, cele esențiale fiind următoarele:

- suficientă porozitate, permeabilitate și capacitate de stocare;
- prezența unei roci impermeabile acoperitoare - așa numitul „cap rock” (ex. marnă, argilă, sare gemă etc) care să prevină migrarea în sus a CO<sub>2</sub>;
- prezența unei „structuri capcană” - cu alte cuvinte, o

- structură cum ar fi cea de dom, care să controleze migrarea CO<sub>2</sub> în cadrul forma iuni rezervor;
- situarea la o adâncime de peste 800 m, unde presiunea și temperatura sunt suficient de ridicate pentru a permite stocarea CO<sub>2</sub> în faza de fluid aflat sub presiune pentru maximizarea cantității stocate;
- absența apei potabile: CO<sub>2</sub> nu va fi injectat în ape care pot fi utilizate pentru consum și activități umane.

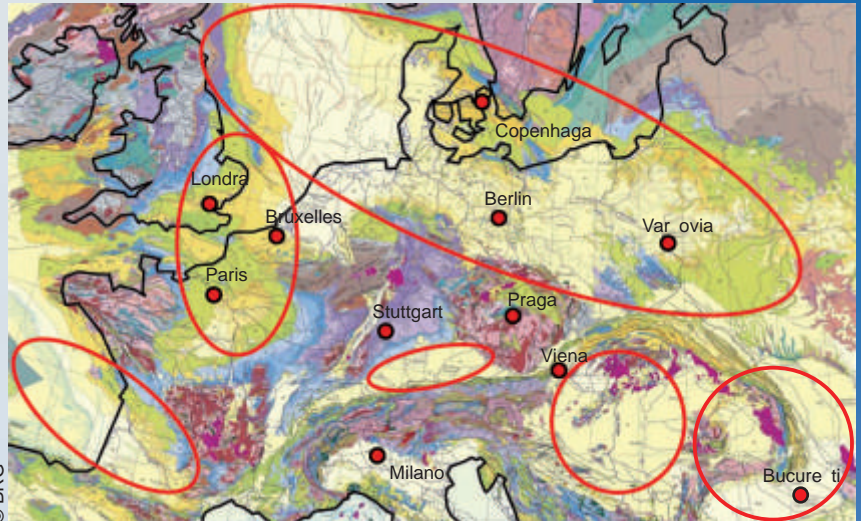
## Unde pot fi găsite locații de stocare în Europa

În Europa se găsesc numeroase bazine sedimentare, de exemplu sub marea Nordului sau în jurul lanului muntos alpin (Fig. 2). Numeroase formațiuni din bazinele din Europa îndeplinesc criteriile necesare pentru stocare geologică și sunt în prezent cartate și caracterizate de cercetători. Alte zone europene sunt alcătuite din scoarță veche consolidată, cum ar fi o mare parte din Scandinavia și deci nu conțin roci adecvate pentru stocarea CO<sub>2</sub>. Un exemplu de zonă cu potențial pentru stocare este Bazinul Permian Sudic ce se întinde din Anglia până în Polonia (reprezentat în Fig. 2 prin elipsa cea mai mare). Sedimentele au fost afectate de procese de formare a rocilor, care au lăsat o parte din spațiul porilor umplut cu apă, petrol sau gaze naturale. Strate de argilă, ce există între gresiile poroase, au fost compactate în strate cu permeabilitate redusă care previn deplasarea ascensională a fluidelor. O mare parte a formaunilor grezoase se situează la adâncimi cuprinse între 1 și 4 km, unde presiunea este suficient de ridicată pentru a stoca CO<sub>2</sub> în fază densă. Conținutul în sare al apelor formaunilor cretace, în acest interval de adâncime, de la 100 g/l la 400 g/l, cu alte cuvinte mult mai sărate decât apa de mare (35 g/l). Mișcările tectonice din bazin au cauzat deformarea plastică a sării, creând structuri domale care, ulterior, au acumulat gaze naturale. Aceste structuri domale sunt astăzi în studiu pentru eventuale situri de stocare și proiecte pilot.

## Capacitatea de stocare

Cunoașterea capacității de stocare a CO<sub>2</sub> este necesară politicienilor, autorităților de reglementare și operatorilor din domeniul stocării. Estimările capacităților de stocare sunt, de obicei, foarte aproximative și se bazează pe extinderea spațială a formaunilor potențial adecvate. Capacitatea poate fi evaluată la diferite scări, de la cea națională și estimări grosiere, până la scara bazinului și chiar a rezervorului pentru calcule mai precise ce iau în considerare heterogenitatea și complexitatea reală a structurii geologice.

**Capacitatea volumetrică.** Capacitățile de stocare națională, publicate, se bazează, de obicei, pe calculul volumului de porii al formaunilor. Teoretic, capacitatea de stocare a unei formațiuni geologice date poate fi calculată înmulțind suprafața cu grosimea sa, porozitatea medie și densitatea medie a CO<sub>2</sub> în condițiile de adâncime. Totuși, întrucât volumul porilor este, deja, ocupat de apă, numai o mică parte mai poate fi utilizată pentru stocare, în general circa 1 - 3%.

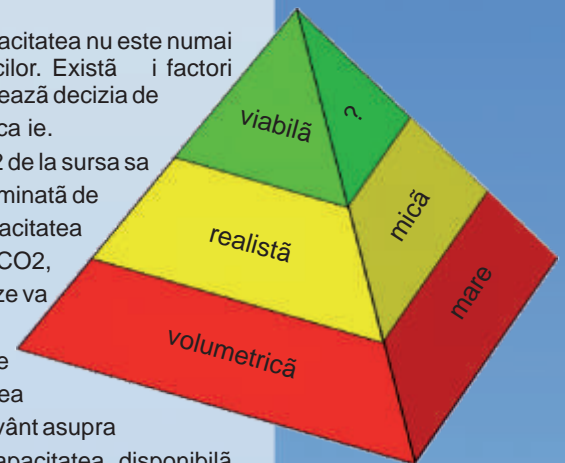


**Figura 2** Harta Geologică a Europei ce arată principalele bazine sedimentare (elipsele roșii) unde pot fi găsite locații adecvate de stocare pentru CO<sub>2</sub>. (bazată pe Harta Geologică a Europei la scara 1:5.000.000).

Acest coeficient de eficiență al stocării se aplică atunci când se evaluează capacitatea de stocare.

**Capacitatea realistă.** Estimări mai realiste ale capacității pot fi făcute asupra locațiilor individuale de stocare prin investigații detaliate. Grosimea formaunilor nu este constantă iar proprietățile rocilor rezervor pot varia pe distanțe mici. Cunoașterea dimensiunilor, a formei și a proprietăților geologice ale structurilor nu permit restrângerea incertitudinilor în calculele volumetrice. Pe baza acestor informații, pot fi utilizate simulările pe calculator, pentru a imagina injecția și mișcarea CO<sub>2</sub> în interiorul rezervorului, pentru a estima o capacitate de stocare realistă.

**Capacitatea viabilă.** Capacitatea nu este numai o problemă de fizică a rocilor. Există și factori socio-economici ce influențează decizia de a utiliza sau nu o anumită locație. De exemplu, aducerea CO<sub>2</sub> de la sursa sa la locul de injecție va fi determinată de costurile transportului. Capacitatea mai depinde și de puritatea CO<sub>2</sub>, deoarece prezența altor gaze va reduce volumul disponibil pentru CO<sub>2</sub>. În fine, opțiunile politice, precum și acceptarea publică, vor avea ultimul cuvânt asupra deciziei de a exploata capacitatea disponibilă dintr-un anumit rezervor.



În concluzie, tim că în Europa capacitatea de stocare este mare, chiar dacă există incertitudini legate de complexitatea rezervoarelor, heterogenitatea lor și factorii geoeconomici. Proiectul european GESTCO\* a estimat capacitatea zăcămintelor de hidrocarburi, din Marea Nordului și din jurul ei, la circa 37 Gt, ceea ce ar permite instalarea iilor industriale din această arie să injecteze bioxid de carbon timp de câteva decenii. Revizuirea estimărilor și cartări suplimentare ale capacității de stocare în Europa este un proces în desfășurare atât în fiecare stat membru cât și în cadrul proiectului EU Geopotential\* pentru ansamblul continentului.



## Cum putem transporta și injecta cantități mari de CO<sub>2</sub>?

După captarea sa într-o instalație industrială, CO<sub>2</sub> este comprimat, transportat și apoi injectat în formațiunile rezorv printr-una sau mai multe găuri de sondă. Pentru a permite stocarea câtorva milioane de tone anual, întregul proces trebuie să fie optimizat.

### Comprimare

CO<sub>2</sub> este comprimat și adus în stare de fluid dens, ce ocupă un spațiu semnificativ mai mic decât gazul. După ce CO<sub>2</sub> a fost separat din gazele ce rezultă la o centrală termoelectrică sau la o altă instalație industrială, fluxul foarte concentrat de CO<sub>2</sub> este deshidratat și comprimat pentru a face transportul și stocarea mult mai eficiente (Fig. 1). Deshidratarea este necesară pentru a evita coroziunea echipamentului și infrastructurii, la presiune foarte mare, formarea hidraților (cristale solide ca de gheață ce pot înfunda echipamentul și conductele). Comprimarea este executată odată cu deshidratarea printr-un proces în mai multe etape: cicluri repetate de comprimare, răcire și separare a apei. Presiunea, temperatura și conținutul de apă trebuie adaptate modului de transport și necesităților de presiune de la locul stocării. Factorii cheie pentru proiectarea instalațiilor de comprimare sunt mărimea fluxului de gaz, presiunea de admisie și de evacuare, capacitatea termică a gazului și eficiența compresorului. Tehnologia de comprimare este disponibilă și utilizată pe scară largă în multe domenii industriale.

foarte departe de un rezorv adecvat. Navele utilizate pentru transportul gazului petrolier lichefiat (GPL) pot fi utilizate și pentru transportul CO<sub>2</sub>. În particular, sistemele semi-refrigerate sunt presurizate și răcite, astfel încât CO<sub>2</sub> poate fi transportat în fază lichidă. Cele mai recente nave pentru GPL au volume de până la 200.000 m<sup>3</sup> și pot transporta 230.000 t de CO<sub>2</sub>. Transportul prin conducte este folosit în prezent de companiile petroliere în operațiunile de Recuperare Secundară\* (există aproximativ 3.000 km de conducte de CO<sub>2</sub> în lume, cele mai multe fiind în Statele Unite). Acest transport este mai eficient din punct de vedere economic decât cel cu navele și oferă avantajul unui flux continuu de la instalația de captare la locul de stocare. Conductele existente de CO<sub>2</sub> operează în condiții supercritice în care CO<sub>2</sub> se comportă ca un gaz, dar are densitatea unui lichid. Trei factori importanți determină cantitatea pe care o poate prelua o conductă: diametrul, presiunea de-a lungul lungimii sale și, ca o consecință, grosimea pereților.

### Injecția

Când ajunge la locul de stocare, CO<sub>2</sub> este injectat sub presiune în rezorv (Fig. 2).

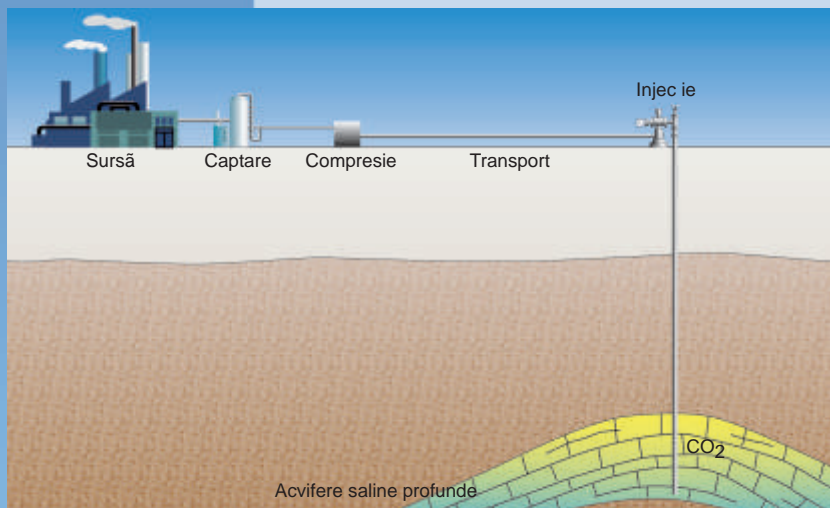
Presiunea de injecție trebuie să fie mult mai mare decât presiunea existentă în rezorv, pentru a forța împingerea fluidului existent din apropierea punctului de injecție. Numărul de găuri de sondă de injecție depinde de cantitatea de CO<sub>2</sub> ce se stochează, de rata de injecție (volumul de CO<sub>2</sub> injectat pe oră), de permeabilitatea și grosimea rezorvului, de presiunea maximă de siguranță și de tipul găurii de sondă. Deoarece obiectivul principal îl reprezintă stocarea pe termen lung a CO<sub>2</sub> trebuie avut grijă de păstrarea integrității hidrologice a formațiunii. Rate mari de injecție pot provoca creșteri de presiune la punctul de injecție, în particular în formațiuni cu permeabilitate redusă. Presiunea de injecție nu trebuie să depășească, în mod obișnuit, presiunea de fracturare a rocii deoarece ar putea provoca afectarea rezorvului sau a rocilor acoperitoare. Pentru identificarea presiunii maxime de injecție, care va evita deteriorarea formațiunii, se utilizează analize și modelări geomecanice.

Rata la care poate fi injectat CO<sub>2</sub> poate fi afectată de procese chimice. În funcție de tipul de rocă a rezorvului, de compoziția fluidelor și de condițiile din rezorv (cum ar fi temperatura, presiunea, volumul, concentrația etc) în apropierea forajului pot apărea procese de dizolvare minerală sau de precipitare.

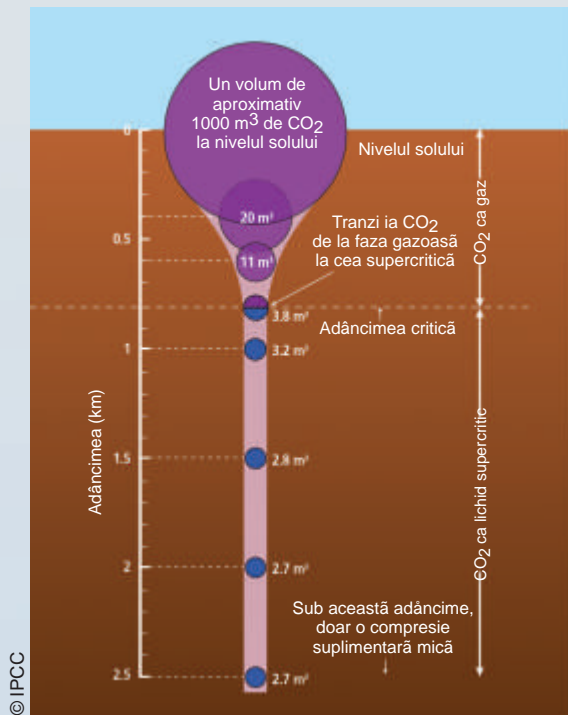
Figura 1  
Etapele stocării geologice a CO<sub>2</sub>. Pentru a putea duce CO<sub>2</sub> de la punctul de emisie spre stocarea sa sigură și durabilă el trebuie să treacă printr-un întreg lanț de operații ce includ captarea, comprimarea, transportul și injecția.

### Transport

CO<sub>2</sub> poate fi transportat cu navele sau prin conducte. Transportul cu navele a CO<sub>2</sub> se efectuează la scară foarte mică (10.000 - 15.000 m<sup>3</sup>) pentru utilizări industriale, dar aceasta ar putea deveni o opțiune pentru proiectele CCS în care o sursă apropiată de țarm se află



© BRGM/im@gé



**Figura 2**  
**Când este injectat în subteran, CO<sub>2</sub> devine un fluid dens, în stare supercritică \* începând de la circa 800 m adâncime. Volumul său se reduce de la 1000 m<sup>3</sup> la suprafață la 2,7 m<sup>3</sup> la adâncimea de 2000 m. Acesta este unul dintre factorii care fac ca stocarea geologică a CO<sub>2</sub> să fie atât de atractivă.**

Acestea pot duce fie la creșterea fie la scăderea ratei de injecție. Imediat după injecție, o parte din CO<sub>2</sub> se dizolvă în apa sărată din rezervor, ceea ce conduce la o ușoară scădere a pH-ului\* compensată de dizolvarea mineralelor carbonatice prezente în roca gazdă. Carbonații sunt primele minerale care se dizolvă, deoarece viteza lor de reacție este foarte mare, iar dizoluția apare imediat ce începe injecția. Procesul de dizoluție poate crește porozitatea rocii și injectivitatea\*. Totuși, după dizoluție, mineralele carbonatice pot precipita, ceea ce conduce la cimentarea formațiunii din jurul găurii de sondă. Pentru reducerea permeabilității în jurul găurii de sondă se pot folosi rate de curgere mai mari, limitându-se, astfel, reducerea permeabilității, depărtând, astfel de punctul de injecție, zona de echilibru geochemic.

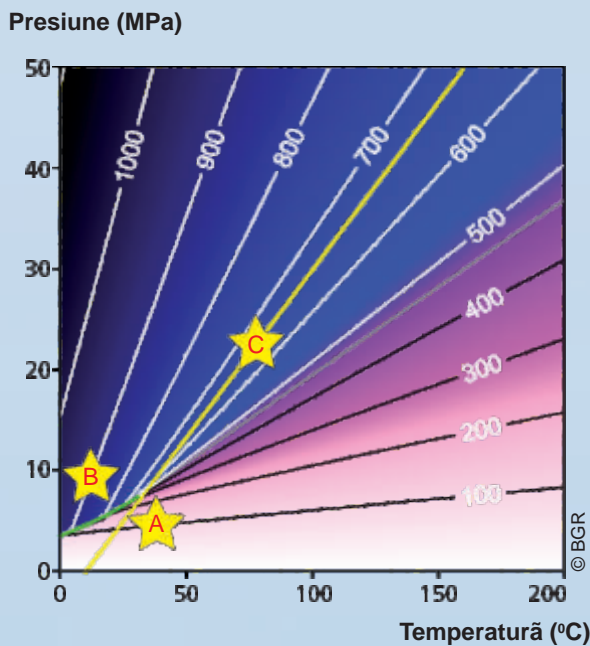
Uscarea este un alt fenomen, indus de injecție. După faza de acidizare, apa reziduală rămasă în jurul găurii de sondă se dizolvă în gazul injectat uscat, care, la rândul său concentrează speciile chimice din saramură\*. Mineralele (cum ar fi sarea) pot, apoi, să precipite când saramura devine suficient de concentrată, reducând astfel permeabilitatea în jurul forajului. Aceste probleme, legate de injectivitate, depind de procesele complexe de

interacțiune ce apar local în apropierea găurii de sondă, dar sunt extrem de dependente de timp și de distanța față de gaura de sondă de injecție. Pentru evaluarea acestor efecte se utilizează simulări numerice. Ratele de injecție trebuie dirijate cu grijă pentru a preveni procesele care pot limita injecția cantității dorite de CO<sub>2</sub>.

## Compoziția fluxului de CO<sub>2</sub>

Compoziția și puritatea fluxului de CO<sub>2</sub>, ce rezultă în urma procesului de captare, au o influență semnificativă asupra tuturor aspectelor subsecvente ale proiectului de stocare. Prezența unor procente mici de alte substanțe cum ar fi apa, hidrogenul sulfurat (H<sub>2</sub>S), oxizii de sulf și azot (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>), azotul (N<sub>2</sub>) și oxigenul (O<sub>2</sub>) vor afecta proprietățile fizice și chimice ale CO<sub>2</sub> și deci și comportarea și impactul său. Trebuie, deci, ca prezența unor astfel de substanțe să fie luată în considerare cu multă atenție la proiectarea fazelor de comprimare, transport și injecție, precum și la stabilirea condițiilor de operare și a echipamentului.

În concluzie, transportul și injecția unor mari cantități de CO<sub>2</sub> este, deja, realizabilă. Totuși, pentru ca stocarea geologică a CO<sub>2</sub> să fie răspândită, pe scară largă, este nevoie ca fiecare stadiu al proiectului să fie dimensionat în funcție de proiectul respectiv. Parametrii cheie sunt proprietățile termodinamice ale fluxului de CO<sub>2</sub> (Fig. 3), mărirea fluxului și condițiile din amonte și din rezervor.



**Figura 3**  
**Densitatea CO<sub>2</sub> pur (în kg/m<sup>3</sup>) în funcție de temperatură și presiune. Linia galbenă corespunde unei presiuni și gradient de temperatură normale dintr-un bazin sedimentar. La adâncimi de peste 800 m (aprox 8 MPa) condițiile de zăcământ facilitează densitatea și mai mari (ha-uri albastre). Curba verde este limita dintre stările lichidă și gazoasă a CO<sub>2</sub>. Condițiile tipice de presiune și temperatură pentru captare, transport și stocare sunt indicate cu literele A, B și, respectiv, C.**

# Ce se întâmplă cu CO<sub>2</sub> odată ajuns în rezervorul de stocare?

Odată ajuns în rezervor, CO<sub>2</sub> se va ridica gravitațional, umplând spațiile porilor rocii gazdă sub roca impermeabilă acoperitoare. În timp o parte din CO<sub>2</sub> se va dizolva și se va transforma, în cele din urmă, în minerale. Aceste procese se petrec la scări diferite de timp și contribuie la o stocare permanentă.

## Mecanisme de captare

Injectat în rezervor, CO<sub>2</sub> se răspândește în porii rocii care sunt deja plini cu saramură (apă sărată). Pe măsură ce CO<sub>2</sub> este injectat încep să acționeze mecanismele descrise mai jos. Primul este considerat cel mai important și împiedică CO<sub>2</sub> să se ridice spre suprafață. Următoarele două tind, cu timpul, să crească eficiența și securitatea stocării.

### 1. Acumularea sub cap rock (capcana structurală)

Deoarece CO<sub>2</sub> dens este mai „uor” decât apa, el începe să se ridice în rezervor. Mișcarea este oprită atunci când CO<sub>2</sub> întâlnește un strat impermeabil, așa-numitul „cap rock”. În mod curent, alcătuit din argilă sau sare, acest cap rock acționează precum o capcană, oprind ascensiunea CO<sub>2</sub> și conducând la acumularea lui imediat sub acesta. Figura 1 ilustrează ascensiunea CO<sub>2</sub> prin spațiul porilor rocii (albastru) până ce întâlnește cap rock.

### 2. Imobilizarea în pori de mici dimensiuni (capcană reziduală)

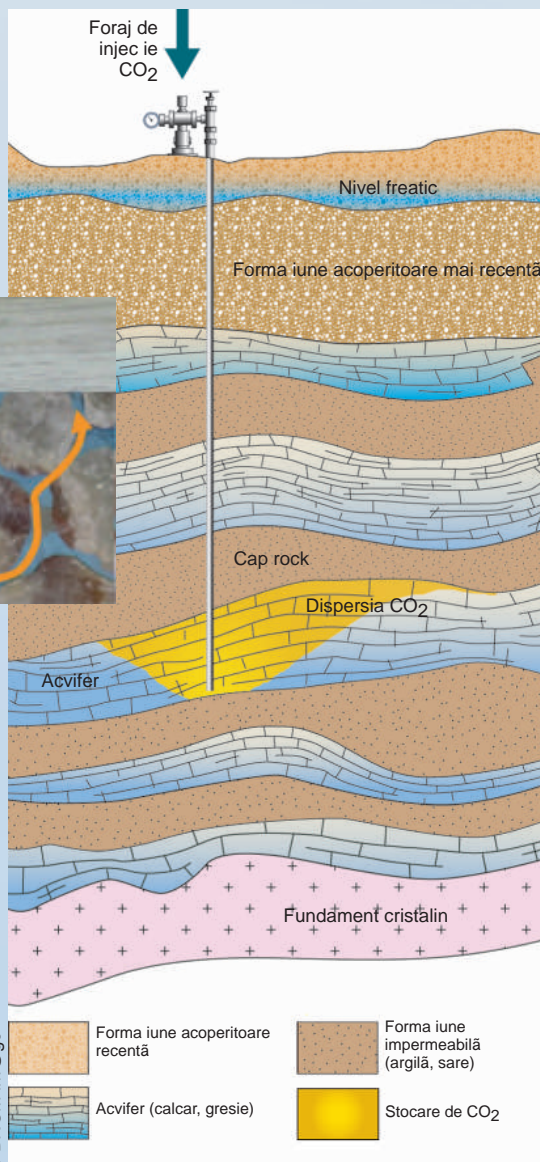
Imobilizarea reziduală apare atunci când spațiul porilor din roca rezervor este prea îngust pentru ca CO<sub>2</sub> să mai migreze în sus, în ciuda diferenței de densitate față de apa din jur. Acest fenomen apare, de obicei, în timpul migrării CO<sub>2</sub> și poate imobiliza un procent mic de CO<sub>2</sub> în funcție de proprietățile rocii rezervor.

### 3. Dizolvare (Capcana prin dizolvare)

O mică proporție din CO<sub>2</sub> injectat este dizolvat sau introdus în soluție de către saramura deja existentă în spațiul porilor. O consecință a dizolvării este aceea că apa cu CO<sub>2</sub> dizolvat este mai grea decât apa fără CO<sub>2</sub> și coboară spre partea inferioară a rezervorului. Rata dizolvării depinde de contactul dintre CO<sub>2</sub> și saramură. Cantitatea de CO<sub>2</sub> ce se dizolvă este limitată de o concentrație maximă. Totuși, datorită deplasării în sus a CO<sub>2</sub> injectat și în jos a apei cu CO<sub>2</sub> dizolvat, există o reînnoire continuă a contactului dintre saramură și CO<sub>2</sub>, ducând, astfel, la creșterea cantității ce se dizolvă. Aceste procese sunt relativ lente, deoarece au loc în interiorul spațiului porilor. Estimări grosiere făcute în cadrul proiectului Sleipner arată că, după 10 ani de injecție, este dizolvat aproximativ 15 % din CO<sub>2</sub> injectat.

### 4. Mineralizarea (Capcana minerală)

CO<sub>2</sub>, în special în combinație cu saramura din rezervor, poate reacționa cu mineralele din care este alcătuită roca. Unele minerale pot fi dizolvate, pe când altele pot precipita, în funcție de pH și de mineralele respective (Fig. 2). Estimările de la Sleipner arată că numai un



Imagine la microscop



Figura 1  
CO<sub>2</sub> injectat, care este mai ușor decât apa, are tendința de a se ridica dar ascensiunea sa este oprită de rocile impermeabile acoperitoare.

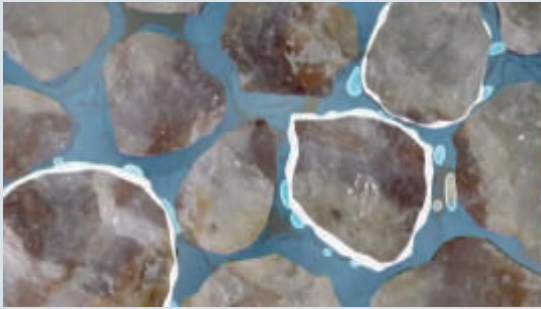


Figura 2

**CO<sub>2</sub> dens migrează în sus (bulele albastru deschis), dizolvă și intră în reacție cu granulele rocii, ceea ce conduce la precipitarea mineralelor carbonatice pe marginile granulelor (alb).**

procent relativ redus de CO<sub>2</sub> va fi imobilizat prin mineralizare și numai după o lungă perioadă de timp. După 10.000 de ani, numai 5 % din CO<sub>2</sub> va fi mineralizat, în timp ce 95 % va fi dizolvat fără a mai exista CO<sub>2</sub> liber în fază densă.

Importanța relativă a acestor mecanisme de capcană depinde, foarte mult, de caracteristicile fiecărei locații. De exemplu, în rezervoarele în formă de dom CO<sub>2</sub> va rămâne în faza densă un timp îndelungat, pe când în rezervoare plane, cum este cel de la Sleipner, cea mai mare parte a CO<sub>2</sub> se dizolvă sau se mineralizează. Evoluția proporției de CO<sub>2</sub>, în diverse mecanisme de capcană pentru cazul Sleipner, este ilustrată în **Figura 3**.

Milioane de tone de CO<sub>2</sub> reținut

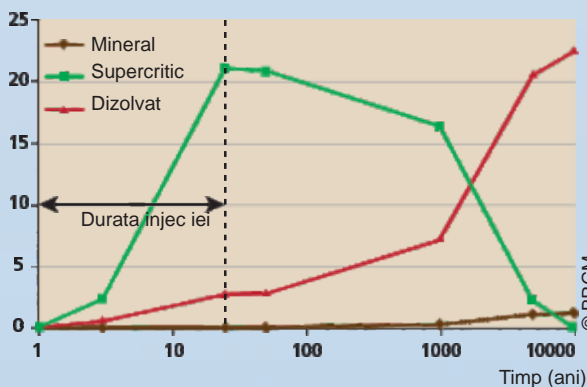


Figura 3

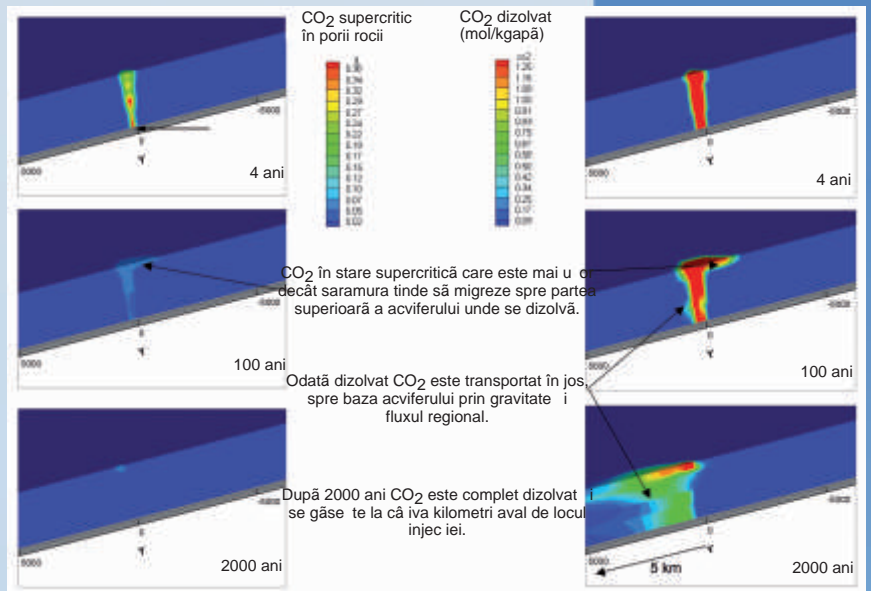
**Evoluția CO<sub>2</sub> în diferitele sale forme în zăcămintul Sleipner conform simulărilor. CO<sub>2</sub> este reținut în starea supercritică prin mecanismele 1 și 2, în stare dizolvată prin mecanismul 3 și în stare minerală prin mecanismul 4.**

## De unde tim toate acestea?

Cunoașterea a ceea ce are loc în timpul acestor fenomene provine de la patru surse principale de informare:

- **Măsurători de laborator:** pot fi realizate experimente, la scară redusă, pe eșantioane de roci pentru mineralizare, curgere și dizolvare, obținându-se informații la scară mică și pentru timpi reduși.
- **Simulări numerice:** au fost realizate procedee de calcul ce pot fi folosite pentru a modela comportarea CO<sub>2</sub> pentru intervale de timp mai mari (Fig. 4). Pentru calibrarea simulărilor numerice se utilizează experimentările în laborator.
- **Studiul zăcămintelor naturale de CO<sub>2</sub>,** unde CO<sub>2</sub> (în general de origine vulcanică) a fost prins în capcană în subsol pentru perioade lungi de timp, deseori, milioane de ani. Astfel de situații sunt definite ca „analogii naturale”. Ele oferă date asupra comportării gazului și asupra consecințelor pe termen lung a prezenței CO<sub>2</sub> în subsol.
- **Monitorizarea proiectelor demonstrative existente de stocare geologică a CO<sub>2</sub>,** cum ar fi Sleipner (Norvegia, pe mare), Weyburn (Canada), In Salah (Algeria) și K12-B (Olanda, pe mare). Rezultatele simulărilor pe termen scurt pot fi comparate cu datele reale din teren și ajută la rafinarea modelelor.

Figura 4  
**Modelarea 3D a migrării CO<sub>2</sub> într-un acvifer din Dogger în Franța după injecția a 150 000 tone în 4 ani. În stânga este reprezentat CO<sub>2</sub> în stare supercritică iar în dreapta, dizolvat în sare după 4, 100 și 2000 de ani de la momentul începerii injecției. Simularea se bazează pe date de teren și experimente.**



Numai prin compararea și verificarea reciprocă a acestor patru surse de informație este posibilă obținerea de cunoștințe sigure asupra proceselor ce se petrec la circa 1 000 m sub picioarele noastre.

În concluzie, tim că siguranța unei locații de stocare a CO<sub>2</sub> tinde să crească cu trecerea timpului. Cel mai critic punct este găsirea unui rezervor cu un cap rock adecvat deasupra sau care poate reține CO<sub>2</sub> (capcana stratigrafică). Fenomenele, legate de dizolvare, mineralizare și capcane reziduale, lucrează în favoarea prevenirii migrării spre suprafață a CO<sub>2</sub>.

# Poate CO<sub>2</sub> să se scurgă în afara rezervorului și dacă se întâmplă acest lucru, care ar putea fi consecințele?

Având la bază studiul sistemelor naturale, locațiile de stocare, alese cu grijă, nu vor prezenta scurgeri semnificative. Rezervoarele naturale, conțin gaz, ne ajută să înțelegem condițiile sub care gazul este ținut în capcană sau eliberat. În plus, locațiile ce prezintă scurgeri ne ajută să înțelegem care este impactul posibil al unei scurgeri de CO<sub>2</sub>.

## Căile de scurgere

În general, căile potențiale de scurgere sunt fie cauzate de om (cum ar fi forajele adânci), fie naturale (cum ar fi sistemele de fracturi și falii).

Atât forajele active cât și cele abandonate pot constitui căi de migrație deoarece, mai întâi ele realizează o legătură directă între suprafață și rezervor și în al doilea rând sunt compuse din materiale ce se pot coroda de-a lungul unei perioade mai mari de timp (Fig. 1). O complicație suplimentară este aceea că nu toate forajele au fost practicate prin utilizarea aceluși metode și astfel forajele mai noi sunt mai sigure decât cele mai vechi. În orice caz, riscul datorat scurgerii prin foraje este de așteptat să fie redus, deoarece atât cele noi cât și cele vechi pot fi monitorizate, foarte eficient, prin utilizarea unor metode geochemice și geofizice și deoarece există deja tehnologie în industria petrolului pentru orice acțiune de remediere necesară.

Fluxul de-a lungul fracturilor și faliilor naturale, ce ar putea exista în cap rock sau în forma iunilor acoperitoare\*, este mai complex deoarece avem de-a face cu fracturi plane și neregulate, cu permeabilitate variabilă. O bună înțelegere tehnifică și tehnică, referitoare la sistemele

naturale cu sau fără scurgeri, ne va permite să proiectăm lucrări de stocare a CO<sub>2</sub> care au aceleași caracteristici ca și rezervoarele ce apar în mod natural și care au ținut în capcană CO<sub>2</sub> sau metan, timp de mii sau milioane de ani.

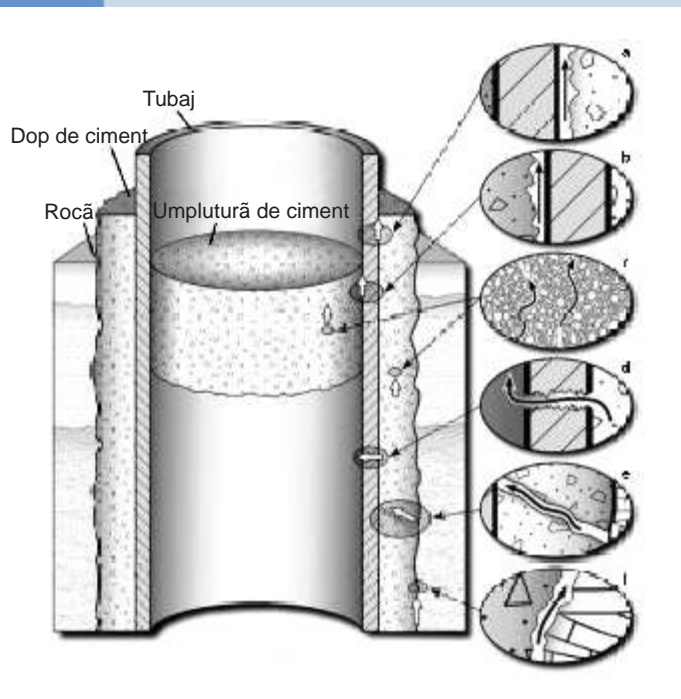
## Analogii naturale: o lecție învățată

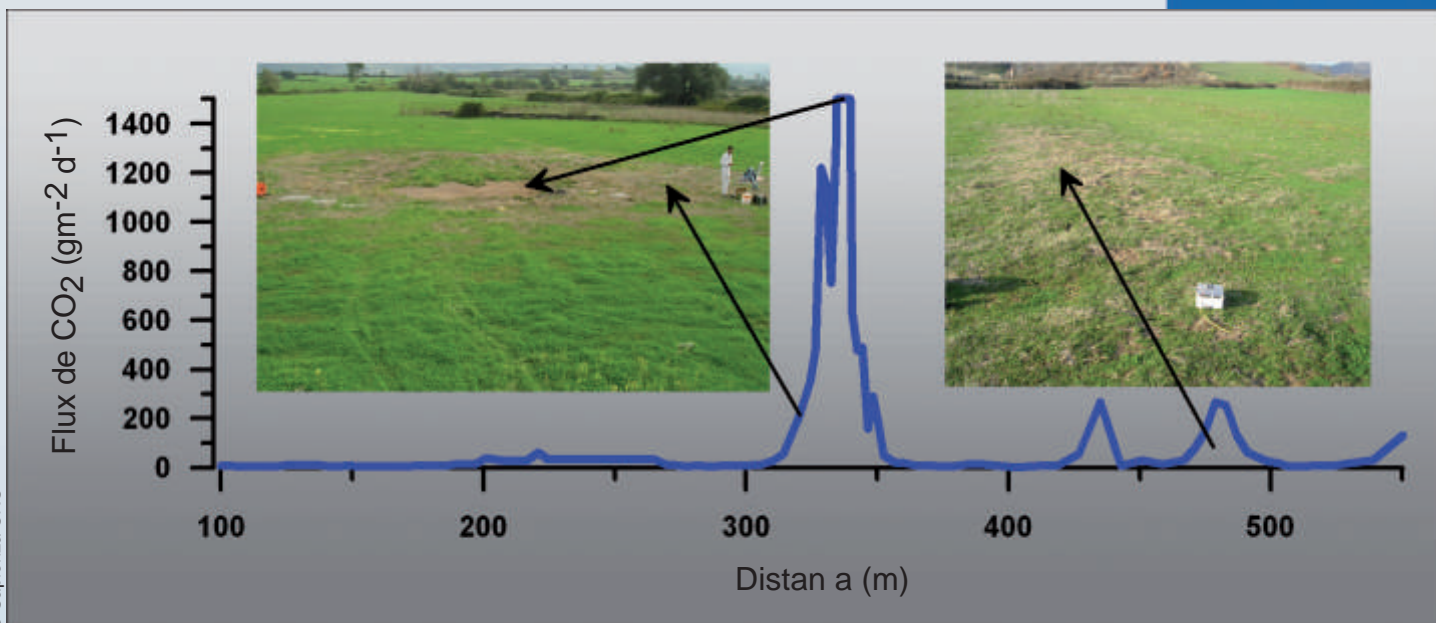
Sistemele naturale (așa-numite „analoage”) sunt surse neprețuite de informație pentru îmbunătățirea modului nostru de înțelegere a migrării gazului la adâncime și a schimbului natural de gaze între pământ și atmosferă. Principalele descoperiri, rezultate din studiul rezervoarelor naturale de gaze cu sau fără scurgeri, sunt următoarele:

- în condiții geologice favorabile, gazul produs natural poate fi reținut sute sau milioane de ani;
- există rezervoare sau punji de gaze chiar și în situațiile cele mai puțin favorabile (ariile vulcanice);
- migrarea oricărei cantități semnificative de gaze necesită advecție (curgere cauzată de diferențe de presiune) deoarece difuzia este un proces extrem de lent;
- pentru a apărea advecția, fluidul din rezervor trebuie să se afle în apropierea presiunii litostatice\*, pentru a fi deschise fracturile și faliile, sau pentru a crea noi căi;
- ariile în care gazul natural se scurge sunt situate aproape în mod exclusiv în regiuni vulcanice sau seismice foarte fracturate, cu orificiile de ieșire a gazelor situate de-a lungul faliilor recent activate; scurgeri semnificative de gaze apar numai rareori și tind să existe numai în zonele vulcanice și geotermale intens fracturate, unde CO<sub>2</sub> este produs în mod continuu prin fenomene naturale; anomalii de gaz de la suprafață apar în arii strict localizate ce au un impact spațial limitat asupra mediului din apropierea suprafeței.

Pentru apariția unor scurgeri de gaze este deci necesară combinarea unui anumit număr de condiții specifice. În consecință, este foarte puțin probabil ca o locație geologică, aleasă bine și pregătită cu grijă, va prezenta scurgeri. Deși probabilitatea apariției unor scăpări este mică, fenomenele asociate și efectele potențiale trebuie înțelese, în totalitate, în scopul alegerii, proiectării și operării celor mai sigure posibile locații de stocare a CO<sub>2</sub>.

**Figura 1**  
Posibilități de migrație a CO<sub>2</sub> dintr-o gaură de sondă. Acesta poate scăpa în locurile în care materialele se deteriorează (c,d,e) sau la diferite contacte (a,b,f).





## Impactul asupra populaiei

Noi respirăm CO<sub>2</sub>, mereu. Acesta poate deveni periculos numai la concentraii foarte mari, valori de peste 5.000 ppm (5%) provocând dureri de cap, ameali i greaă. Valori deasupra acestui nivel pot provoca moartea, dacã expunerea este îndelungatã, în special prin asfixie, atunci când concentra ia de oxigen în aer scade sub 16 %, nivel necesar pentru a sus ine via a. Totu i, dacã CO<sub>2</sub> se scurge, într-o zonã deschisã sau planã, el este rapid dispersat în aer chiar i sub curen i mode ti. Poten ialul risc pentru popula ie este, astfel, restrâns la spa ii închise sau depresiuni topografice unde concentra ia poate cre te deoarece CO<sub>2</sub> este mai dens decât aerul i tinde sã se acumuleze în apropierea solului. În realitate, numero i oameni locuiesc în zone caracterizate de emana ii zilnice de gaze naturale. De exemplu, în Italia la Ciampino, în apropierea Romei, existã case amplasate la numai 30 m de orificiile prin care ies gaze unde concentra ia de CO<sub>2</sub> în sol ajunge la 90% i unde circa 7 tone de CO<sub>2</sub> scapã zilnic în atmosferã. Localnicii evitã orice pericol, luând precau iuni simple cum ar fi faptul cã nu dorm în subsoluri i în casele bine aerisite.

## Impactul asupra mediului înconjurãtor

Impactul poten ial asupra ecosistemelor variazã în func ie de unde este localizatã stocarea, în mare sau pe uscat.

În ecosistemele marine, principalul efect al unei scurgeri de CO<sub>2</sub> este scãderea localã a pH i impactul asociat, în principal, asupra animalelor ce trãiesc pe fundul mãrii i nu se pot deplasa. Totu i, consecin ele sunt limitate spa ial iar ecosistemul prezintã semne de recuperare, dupã ce scurgerea se reduce. În ecosistemele terestre, impactul poate fi, în general, rezumat astfel:

- **vegeta ie** - De i concentra iile de CO<sub>2</sub> în sol de 20 - 30 % favorizeazã, de fapt, fertilizarea plantei i spore te rata de cre tere a anumitor specii, valorile deasupra acestui prag pot fi letale pentru unele dintre ele, dar nu pentru toate. Efectul este extrem de localizat în jurul zonei de scãpare a gazelor iar vegeta ia rãmâne robustã i neafectatã, la numai câ iva metri distanã (Fig. 2);
- **calitatea apei subterane** - Compozi ia chimicã a apei subterane poate fi modificatã prin adãugare de CO<sub>2</sub>, deoarece apa devine mai acidã i anumite elemente pot migra din rocile i mineralele acviferului. Chiar dacã CO<sub>2</sub> s-ar scurge într-un acvifer cu apã potabilã, efectele vor rãmâne localizate iar cercetãtorii se ocupã, în prezent, de cuantificarea impactului. Interesant de men ionat este faptul cã numeroase acvifere din Europa sunt îmbogã ite cu CO<sub>2</sub> natural i aceastã apã este îmbuteliatã i vândutã cu numele de „apã mineralã carbogazoasã”;
- **integritatea rocilor** - Acidizarea apei subterane poate conduce la dizolvarea rocilor, scãderea integritã ii lor structurale i formarea de goluri. Totu i acest tip de impact apare numai în condi ii geologice i hidrogeologice specifice (arii active tectonic, debit ridicat, roci bogate în minerale carbonatice) pu in probabil sã existe deasupra rezervoarelor de CO<sub>2</sub> realizate de om.

În concluzie, întrucãt impactul oricãrei scurgeri ipotetice de CO<sub>2</sub> va depinde de condi iile specifice ale loca iei, o cunoa tere detaliatã a alcãtuirii geologice i structurale a ariei ne va permite identificarea cãilor poten iale de migrare, alegerea zonelor cu cel mai scãzut poten ial de scurgere de CO<sub>2</sub>, determinarea comportãrii gazului i astfel, evaluarea i prevenirea oricãrui impact asupra popula iei i ecosistemului.

**Figura 2**  
Impactul scurgerilor de CO<sub>2</sub> asupra vegeta iei cu flux ridicat (stânga) sau moderat (dreapta). Impactul este limitat numai în zona scurgerii.

## Cum poate fi monitorizată, la adâncime și la suprafață, o locație de stocare?

Din motive operaționale de siguranță, socială și economică, toate locațiile de stocare a CO<sub>2</sub> vor trebui să fie monitorizate. A fost definită o strategie referitoare la ce anume trebuie monitorizat și în ce fel.

### De ce este necesară

Monitorizarea performanței unei locații este esențială pentru a ne asigura că principalul scop al stocării geologice a CO<sub>2</sub>, adică izolarea față de atmosferă a CO<sub>2</sub> antropogenic este atins. Motivele monitorizării locației sunt numeroase. Dintre acestea menționăm:

- **Operaționale:** pentru a urmări și optimiza procesul de injecție.
- **De siguranță și pentru protecția mediului:** pentru a minimaliza sau a preveni orice impact asupra populației, viitoarelor și ecosistemelor din vecinătatea locației de stocare și pentru a asigura reducerea modificărilor climatice.
- **Sociale:** pentru a oferi publicului informații necesare pentru înțelegerea siguranței unei locații de stocare și pentru a ajuta la obținerea încrederii populației.
- **Financiare:** pentru a induce încrederea pieței în tehnologia CCS și pentru a verifica volumele de CO<sub>2</sub>, astfel încât ele să fie creditate drept „emisii evitate” în fazele viitoare ale Schemei Europene de Comercializare a Emisiilor.

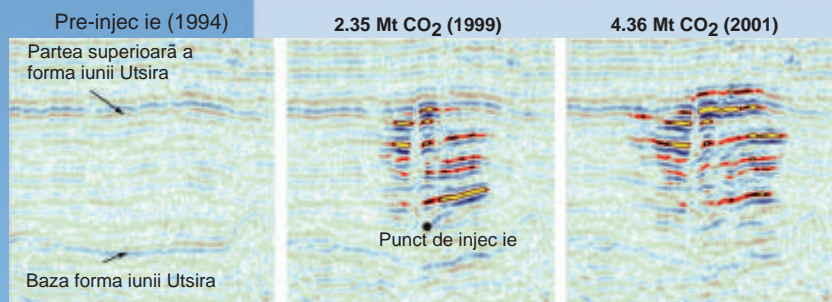
Monitorizarea atât a stării inițiale a mediului (a a numita „starea inițială”) cât și performanța ulterioară a locației este o cerință importantă din Directiva UE, referitoare la CCS publicată în proiect la 23 ianuarie 2008. Operatorii trebuie să poată demonstra că performanțele stocării sunt conforme cu reglementările și vor rămâne așa pe termen lung. Monitorizarea este o componentă importantă ce va reduce incertitudinile referitoare la performanța locației și în acest fel ea este conectată, puternic, cu activitățile de management al siguranței.

### Care sunt obiectivele monitorizării?

Monitorizarea poate avea drept scop diferite obiective sau procese existente în diferite părți ale locației cum ar fi:

- Imaginea zonei invadate - urmărirea modului în care CO<sub>2</sub> migrează în jurul punctului de injecție. Aceasta furnizează date cheie pentru calibrarea modelelor ce imaginează distribuția viitoare a CO<sub>2</sub>, în cadrul locației respective. Sunt disponibile numeroase procedee mature, cea mai notabilă fiind prospecțiunea seismică repetată, care a fost aplicată, cu succes, în câteva proiecte demonstrative sau pilot (**Fig. 1**).
- Integritatea cap-rockului - necesară pentru a evalua dacă CO<sub>2</sub> este izolat în interiorul rezervorului de stocare și de a furniza atenție asupra oricărei migrații ascensionale a acestuia. Aceasta este importantă în special în faza de injecție a unui proiect, atunci când presiunile sunt, temporar dar semnificativ, crescute.
- Integritatea forajului. Aceasta este o problemă importantă, deoarece forajele adânci pot constitui o cale directă de migrare a CO<sub>2</sub> către suprafață. Forajele de injecție, plus orice foraje de observație sau foraje pre-existente, abandonate trebuie să fie monitorizate cu grijă în timpul fazei de injecție și, dincolo de aceasta, pentru a preveni o scurgere bruscă a CO<sub>2</sub>. Monitorizarea este folosită și pentru a verifica dacă toate forajele au fost închise eficient, atunci când nu mai sunt utilizate. Sistemele existente geochimice și geofizice de monitorizare, care sunt standardizate în industria petrolieră și gazeiferă, pot fi instalate în interiorul sau deasupra forajelor, pentru a oferi avertizare timpurie și a asigura securitatea lor.
- Migrarea în stratele acoperitoare. La locațiile de stocare, unde unități stratigrafice superioare, mai puține adânci, au proprietăți similare celor prezentate de cap-rock, aceste straturi acoperitoare formează un element esențial în reducerea riscurilor de scăpare a CO<sub>2</sub> în ocean sau la suprafață. Dacă monitorizarea în rezervor sau în cap rock indică o migrație neașteptată prin acesta din urmă, va fi necesară și monitorizarea formăunilor acoperitoare. În aceasta pot fi folosite metodele de monitorizare utilizate pentru urmărirea distribuției în situ a CO<sub>2</sub> și pentru monitorizarea la nivel de cap rock.
- Scăparea la suprafață, detecția și determinarea atmosferică. Pentru a ne asigura că CO<sub>2</sub> injectat nu a migrat spre suprafață, sunt disponibile o gamă de metode geochimice, biochimice și de teledetecție pentru localizarea, evaluarea și monitorizarea distribuției CO<sub>2</sub> în sol, precum și dispersia sa în atmosferă sau mediul marin (**Fig. 2**).

Figura 1  
Imaginea seismică a extinderii zonei\* cu CO<sub>2</sub> la proiectul pilot Sleipner înainte de injecție (care a început în 1996) și după injecție la 3 și 5 ani mai târziu).



- Cantitatea de CO<sub>2</sub> stocat în scopuri fiscale și de conformare cu reglementările. Deși cantitatea de CO<sub>2</sub> injectat poate fi măsurată cu ușurință la gura forajului, cuantificarea în interiorul rezervorului prezintă dificultăți. Dacă apar scăpări în apropierea suprafeței, atunci cantitatea ce a scăpat trebuie cuantificată atât în scopul inerii evidenței în cadrul inventarului național de gaze cu efect de seră cât și pentru viitoarele scheme de comercializare ale lor.
- Mișcările solului și microseismicitatea\*. Presiunea sporită din rezervor cauzată de injectarea de CO<sub>2</sub> ar putea, în anumite cazuri, să crească potențialul de microseismicitate și să declanșeze mișcări ale solului la scară redusă. Există metode de monitorizare microseismică și de teledetecție, care pot evidenția chiar și mișcări extrem de mici ale solului.

## Strategia de monitorizare

La proiectarea unei strategii de monitorizare trebuie luate numeroase decizii ce depind de condițiile geologice și ingineriești specifice fiecărei locații, cum ar fi geometria și adâncimea rezervorului, presupusa distribuție a CO<sub>2</sub>, căile de scurgeri potențiale, geologia straturilor acoperitoare, timpul și fluxul de injectare, caracteristicile suprafeței,



© CO<sub>2</sub>GeoNet

**Figura 2**  
Geamandură de monitorizare cu panouri solare pentru obținerea energiei și dispozitiv de captare a gazului de pe fundul mării.

## Cum se face monitorizarea?

O mare varietate de metode de monitorizare au fost deja aplicate în cadrul proiectelor de cercetare și demonstrative. Acestea includ metode care monitorizează direct CO<sub>2</sub>, precum și altele care măsoară indirect efectele acestuia asupra rocilor, fluidelor și mediului. Măsurătorile directe includ analizele de fluide din foraje adânci sau măsurătorile de gaze din sol sau atmosferă. Metodele indirecte sunt cele geofizice, monitorizarea variațiilor de presiune în foraje și ale pH-ului din apa subterană.

Monitorizarea locațiilor de stocare va trebui efectuată indiferent dacă acestea sunt pe mare sau pe uscat. Selectarea metodelor de monitorizare, adecvate, va depinde de caracteristicile geologice și tehnice ale locației, dar și de scopul monitorizării. Există deja o gamă largă de tehnici de monitorizare disponibile (Fig.3) multe dintre ele fiind deplin verificate în industria de petrol și gaze; este în curs adaptarea acestor tehnici la contextul CO<sub>2</sub>. De asemenea, se află în curs de realizare cercetările de optimizare a metodelor existente sau de elaborare a unor noi, scopul fiind îmbunătățirea rezoluției și a gradului de încredere, operare automată și eficiență demonstrată.

cum ar fi relieful, densitatea de locuitori, infrastructura și ecosistemele. Odată ce s-au luat deciziile referitoare la cele mai adecvate metode și locuri de monitorizare, trebuie realizate măsurătorile, înainte de începerea operațiunilor de injectare, ce vor servi ca referință pentru toate măsurătorile viitoare.

În fine, orice program de monitorizare trebuie să fie flexibil, astfel încât să poată evolua pe măsură ce evoluează proiectul de stocare.

O strategie de monitorizare capabilă să integreze toate aceste aspecte și, în același timp, să îmbunătățească eficiența economică va forma o componentă esențială în analiza de risc și în verificarea siguranței și eficienței locației.

În concluzie, tim deja că este posibilă monitorizarea unei locații de stocare cu ajutorul a numeroase metode disponibile pe piață sau în curs de elaborare.

În prezent se desfășoară cercetări nu numai pentru realizarea unor noi instrumente (în special pentru utilizare pe fundul mării), dar și pentru optimizarea performanței monitorizării și reducerea costurilor.



**Figura 3**  
O mică selecție pentru exemplificarea diversității metodelor de monitorizare a sistemelor de stocare a CO<sub>2</sub>.



## Ce criterii de siguranță trebuie impuse și respectate?

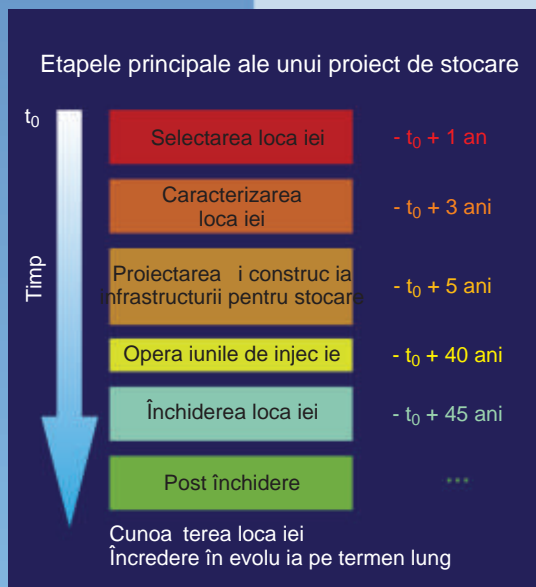
Pentru asigurarea siguranței și eficienței stocării, autoritățile de reglementare trebuie să impună, iar operatorii trebuie să respecte, anumite condiții pentru proiectare și operare.

Deși stocarea geologică este acceptată pe scară largă, ca una dintre opțiunile credibile de reducere a schimbărilor climatice, trebuie stabilite criteriile de siguranță legate de sănătatea populației și de mediu, înainte de a se trece la operațiuni pe scară largă. Astfel de criterii pot fi definite ca cerințe impuse operatorilor de către autoritățile de reglementare pentru a garanta că impactul asupra sănătății și mediului (inclusiv resursele de apă subterană) sunt neglijabile pe termen scurt, mediu și lung.

O problemă cheie a stocării geologice este aceea că ea trebuie să fie permanentă, în consecință, locațiile de stocare nu trebuie să permită scăparea în afară a CO<sub>2</sub>. Cu toate acestea, scenariul „iși dacă, totuși?” presupune că trebuie avute în vedere riscurile, iar operatorii să li se ceară să respecte măsurile ce previn orice posibile scăpări sau comportări anormale ale locațiilor. Conform IPCC, CO<sub>2</sub> trebuie să rămână în subsol cel puțin în 1 000 de ani, pentru a permite concentrațiilor atmosferice de CO<sub>2</sub> să se stabilizeze sau să scadă, prin schimbul natural cu apele oceanice, minimizând, în acest fel, creșterea temperaturii datorate încălzirii globale. Totuși, impactul local trebuie evaluat pe o scară de timp, ce variază de la zile la mii de ani. În durata de viață a unui proiect de stocare pot fi identificate mai multe etape (Fig. 1). Siguranța va trebui asigurată prin:

- selectarea și studiul atent al locației;
- evaluarea siguranței;
- operarea corectă;
- un plan adecvat de monitorizare;
- un plan adecvat de remediere.

Figura 1  
Diferitele etape ale  
unui proiect de stocare.



Acest fapt are importanță pentru a evita orice interacțiuni cu forajul, rezervorul și cu rocile din cap-rock, iar în cazul unor scăpări, cu apă subterană situată deasupra rezervorului.

### Criterii de siguranță pentru proiectare

Siguranța trebuie demonstrată înainte de începerea operațiilor. În legătură cu alegerea locației, principalele componente ce trebuie examinate sunt:

- rocile din rezervor și din cap-rock;
- formațiunile geologice acoperitoare și în particular stratele impermeabile ce pot constitui capcane secundare;
- prezența unor falii sau foraje permeabile ce pot constitui căi de acces spre suprafață;
- acvifere cu apă potabilă;
- constrângerile legate de populație și de mediu, existente la suprafață.

Pentru evaluarea geologiei și geometriei locației de stocare se folosesc metodele utilizate în explorarea petrolului și gaze. Modelarea chimică și geomecanică a fluxului de CO<sub>2</sub> fluid în interiorul rezervorului, permit evaluarea comportării sale, rezultatul pe termen lung precum și definirea parametrilor pentru o injecție eficientă. Drept rezultat, caracterizarea atentă a locației trebuie să permită definirea unui scenariu de comportare „normală” a stocării, corespunzător unei locații adecvate pentru stocare, în care avem încredere că CO<sub>2</sub> va rămâne în rezervor. Evaluarea riscului trebuie, deci, să ia în considerare scenariul, mai puțin plauzibile, referitoare la stările viitoare ale stocării, incluzând apariția unor evenimente neașteptate. În particular, este importantă luarea în considerare a oricăror căi de scurgere, expuneri și efecte (Fig. 2). Fiecare scenariu de scurgere trebuie analizat de experți, acolo unde este posibil, să se aplice modelarea numerică, pentru evaluarea probabilității de apariție și gravitatea potențială. Ca exemplu, evoluția extinderii zonei cu CO<sub>2</sub> trebuie evidențiată cu grijă pentru a evidenția orice posibilă legătură cu o zonă de falii. În estimarea riscurilor mai trebuie luate în considerare sensibilitatea la variațiile parametrilor și incertitudinile de intrare. Estimarea efectelor potențiale asupra populației și mediului trebuie evaluate prin studii de impact, ce reprezintă o practică curentă în orice proces de aprobare a unei instalații industriale. În acest proces, atât scenariile normale, cât și cele cu scurgeri, trebuie luate în considerare pentru a evalua orice risc potențial legat de instalarea respectivă.

Obiectivele critice asociate sunt:

- asigurarea rămânerii în rezervor a CO<sub>2</sub>;
- menținerea integrității forajului;
- păstrarea proprietăților fizice ale rocii rezervor (incluzând porozitatea, permeabilitatea, injectivitatea) și a naturii impermeabile;
- a rocilor din cap-rock; luarea în considerare a compoziției fluxului de CO<sub>2</sub> urmărind cu atenție prezența oricărei impurități ce nu a fost eliminată în procesul de captare.

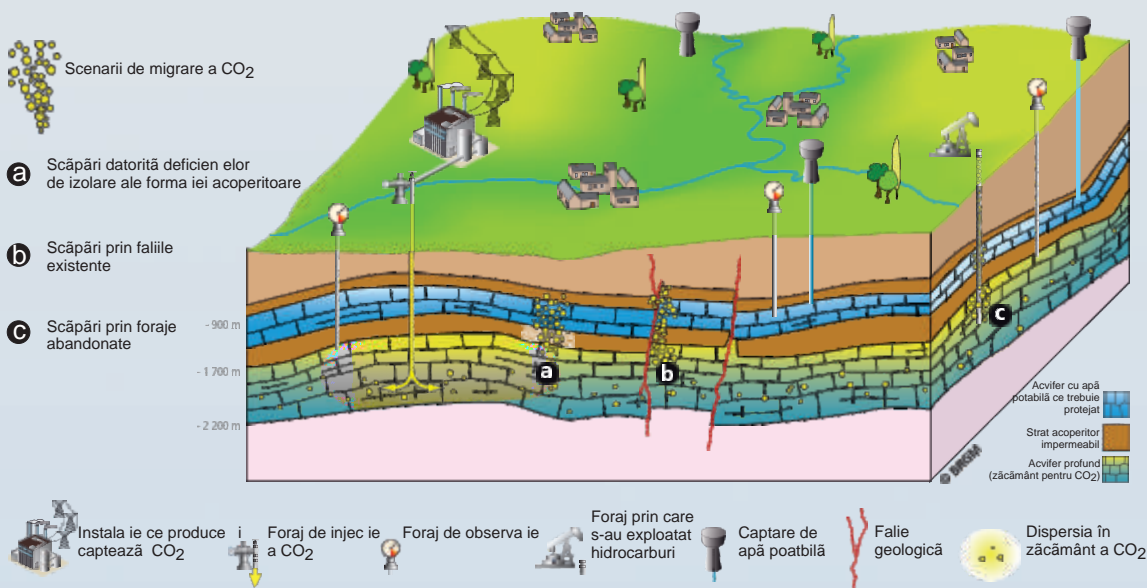


Figura 2  
Exemple de scenarii  
posibile de scăpări ale CO<sub>2</sub>.

Programul de monitorizare, pe termen scurt și lung trebuie stabilit în conformitate cu analiza de evaluare a riscului și se va referi la parametri critici definiți pentru diferite scenarii. Principalele sale obiective sunt reprezentarea avansării zonei impregnate cu CO<sub>2</sub>, urmărirea integrității forajului și a rocilor ce alcătuiesc cap-rock, detectarea oricărei scurgeri de CO<sub>2</sub>, evaluarea calității apei subterane și asigurarea că nici o cantitate de CO<sub>2</sub> nu a ajuns la suprafață. Planul de remediere și de reducere a efectelor reprezintă ultima componentă a evaluării siguranței și are drept scop detalierea listei de acțiuni de remediere ce trebuie luate în cazul unor scurgeri sau a unei comportări anormale. El acoperă integritatea rocilor din cap-rock în timpul și după injecție și ia în considerare soluții extreme de remediere, cum ar fi reversibilitatea stocării. Cunoștințele actuale se referă la metodele utilizate în industria de petrol și gaze, cum sunt scăderea presiunii de injecție, îndepărtarea parțială sau totală a gazului, extracția apei pentru reducerea presiunii, extragerea gazelor superficiale etc.

### Criteria de siguranță din timpul operației și după închiderea ei

Principala grijă referitoare la siguranță este legată de faza operațională: după ce încetează injecția, scăderea presiunii face ca locația să devină mai sigură. Încrederea în capacitatea de injecție și stocare a CO<sub>2</sub>, într-o manieră sigură, se bazează pe experiența companiilor industriale. CO<sub>2</sub> este un produs relativ obișnuit, folosit în diferite domenii și a cărei manipulare nu ridică nici o problemă. Proiectarea și urmărirea operațiilor se va baza, în principal, pe know-how-ul din industria de petrol și gaze, în particular din stocarea sezonieră a gazelor naturale sau din operațiile de recuperare secundară a petrolului. Principalii parametri ce trebuie avuți în vedere sunt:

- presiunea de injecție și mărimea fluxului - prima trebuie menținută sub presiunea de fracturare, adică presiunea la care se induc fracturi în rocile din cap rock;

- volumul injectat - în scopul atingerii cifrelor obținute prin modelare;
- compoziția CO<sub>2</sub> injectat;
- integritatea forajului sau forajelor de injecție și a oricărui alt foraj, localizat în interiorul sau în imediata vecinătate a zonei în care se va acumula CO<sub>2</sub>;
- evoluția în spațiul a zonei cu CO<sub>2</sub> stocat și detectarea oricărei scăpări;
- stabilitatea solului.

În timpul injecției, comportarea efectivă a CO<sub>2</sub> injectat trebuie comparată mereu cu modelul teoretic inițial. Acest fapt îmbunătățește cunoștințele asupra locației. Dacă se detectează vreo comportare anormală, programul de monitorizare trebuie refăcut și dacă este necesar se vor lua măsuri de corectare. În cazul că sunt suspectate scurgeri, procedee specifice de monitorizare pot fi aplicate pe zona respectivă a sitului de stocare, de la rezervor până la suprafață. Acestea vor detecta ascensiunea CO<sub>2</sub> și, mai mult, orice efect advers pe care aceasta l-ar putea avea asupra acviferelor de apă potabilă, mediu și nu în ultimul rând, asupra populației. Când se termină injecția, începe faza de închidere: forajele trebuie obturate și abandonate în mod corespunzător și dacă este necesar se vor lua măsuri de corecție pentru reducerea riscului. Odată ce nivelul riscului este suficient de scăzut, responsabilitatea stocării va fi transferată autorităților naționale, iar planul de monitorizare poate fi stopat sau minimizat.

Directiva Europeană stabilește cadrul legal ce asigură faptul că operația de captură și stocare a CO<sub>2</sub> este o metodă de reducere a emisiilor și că ea poate fi realizată în siguranță și cu responsabilitate.

În concluzie, criteriile de siguranță sunt esențiale pentru asigurarea succesului dezvoltării industriale a stocării CO<sub>2</sub>. Ele trebuie adaptate fiecărei locații de stocare. Aceste criterii vor fi deosebit de importante pentru asigurarea acceptării populației și esențiale în procesul de acordare a licențelor pentru care agențiile de reglementare trebuie să decidă nivelul de detaliere pentru măsurile de siguranță.

**Acvifer:** un corp permeabil de roci ce conține apă. Cele mai superficiale acvifere conțin apă proaspătă utilizată pentru consumul uman. Cele de la adâncime mai mare sunt pline de apă sărată care nu este adecvată pentru nici o necesitate umană. Acestea se numesc acvifere salin.

**Analogie naturală:** zăcămint natural de CO<sub>2</sub>. Există locații care prezintă scurgeri spre suprafață precum și locații fără astfel de scurgeri. În studiul lor poate îmbunătăți modul nostru de alegere a soartei CO<sub>2</sub> din sistemele geologice profunde.

**Cap rock:** strat impermeabil de rocă ce acționează ca o barieră în calea deplasării lichidelor sau gazelor și care formează o capcană atunci când sunt situate deasupra unui rezervor.

**CCS:** captarea și stocarea CO<sub>2</sub>.

**CSLF:** Carbon Sequestration Leadership Forum. O inițiativă internațională legată de modificările climatice care se concentrează pe dezvoltarea unor tehnologii îmbunătățite eficiente pentru separarea și captarea dioxidului de carbon, transportul și stocarea sa în siguranță pe termen lung.

**Distribuția CO<sub>2</sub>:** distribuția spațială a CO<sub>2</sub> în stare supercritică în interiorul unui strat de roci.

**EU Geocapacity:** un proiect european în curs de derulare care evaluează posibilitățile de stocare geologică a CO<sub>2</sub> în țările europene.

**Foraj (sau gaură de sondă):** O gaură circulară executată prin săpare prin sondă, cu adâncime mare și diametru mic, cum ar fi forajele pentru petrol. Formele acoperitoare: strate geologice situate între cap-rock și suprafața pământului (sau fundul mării).

**GESTCO:** un proiect european de cercetare încheiat care a evaluat posibilitățile de stocare a CO<sub>2</sub> în 8 țări (Norvegia, Danemarca, Regatul Unit, Belgia, Olanda, Germania, Franța și Grecia).

**IEA-GHG:** International Energy Agency - Greenhouse Gas R&D programme. O colaborare internațională care are drept scop evaluarea metodelor de reducere a emisiilor de gaze cu efect de seră, diseminarea rezultatelor acestor studii și identificarea obiectivelor pentru cercetare, dezvoltare și demonstrare și de promovare a lucrărilor respective.

**Injectivitate:** caracterizează ușurința cu care un fluid

(cum ar fi CO<sub>2</sub>) poate fi injectat într-o formă iune geologică. Se definește ca rata de injecție împărțită la diferența de presiune între punctul de injecție de la baza forajului și forma iune.

**IPCC:** International Panel on Climate Change. Această organizație a fost înființată în 1988 de WMO (World Meteorological Organization) și UNEP (United Nations Environment Programme) pentru a evalua informațiile științifice, tehnice și socio-economice relevante pentru alegerea schimbărilor climatice, impactelor lor potențiale și opțiunile pentru adaptare și reducere a efectelor. IPCC și Al Gore au primit premiul Nobel pentru pace în 2007.

**Microseismicitate:** oscilație ușoară sau vibrație a crustei terestre, nelegată de cutremure ce poate fi provocată de o diversitate de agenți naturali sau artificiali.

**Permeabilitate:** proprietatea sau capacitatea unei roci poroase de a transmite un fluid; ea măsoară ușurința relativă a unui fluid de a curge sub un gradient de presiune.

**pH:** măsoară aciditatea unei soluții unde pH 7 corespunde unei soluții neutre.

**Porozitate:** procentul din volumul total al rocii care nu este ocupat de mineralele constituente. Aceste goluri sunt numite pori și pot fi umplute cu diferite fluide; în mod obișnuit în rocile situate în adâncime, acest fluid este apă sărată dar mai poate fi petrol sau gaze naturale cum ar fi metanul sau CO<sub>2</sub> format în mod natural.

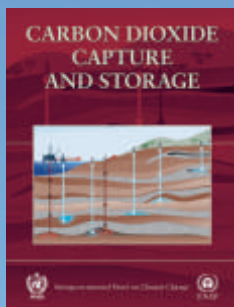
**Presiune litostatică:** forța exercitată asupra unei roci din subsol de către rocile situate deasupra. Presiunea litostatică crește cu creșterea adâncimii.

**Recuperare Secundară:** o metodă ce îmbunătățește producția de petrol prin injecția de fluide (abur sau CO<sub>2</sub>) ce ajută la mobilizarea și ieșirea din zăcămint.

**Rezervor:** Corp de rocă sau sedimente ce este suficient de poros și permeabil pentru a găzdui și stoca CO<sub>2</sub>. Rocile rezervor cele mai comune sunt gresiiile și calcarele.

**Saramură:** apă foarte sărată adică conține o concentrație ridicată de săruri dizolvate.

**Supercritică:** starea unui fluid la presiune și temperatură deasupra punctului critic (31,03 °C și 7,38 MPa pentru CO<sub>2</sub>). Proprietățile unor astfel de fluide sunt în variație continuă, de la aspect de gaz, la presiuni reduse, la aspect de lichid, la presiuni mari.



**Informații suplimentare:**

**Raportul special referitor la CCS al IPCC:**

[http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs\\_wholereport.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf)

**Pagina web a Comisiei Europene referitoare la CCS**

<http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/>

**Directiva CCS a Comisiei Europene:**

[http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/eccp1\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/eccp1_en.htm)

**Sistemul ETS:**

<http://ec.europa.eu/environment/climat/emission.htm>

**Pagina IEA GHG de monitorizare a instrumentelor de monitorizare:**

[http://www.co2captureandstorage.info/co2tool\\_v2.1beta/introduction.html](http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html)
















# Ce poate face CO<sub>2</sub>GeoNet pentru dumneavoastră



**CO<sub>2</sub>GeoNet** este o Rețea Europeană de Excelență, care este angajată în furnizarea de informații științifice solide și neangajate politic legate de siguranța și eficiența stocării geologice a CO<sub>2</sub>. Parteneriatul constă din peste 150 de cercetători științifici din 13 instituții publice de cercetare, fiecare partener având o reputație internațională ridicată în toate aspectele legate de cercetarea stocării geologice a CO<sub>2</sub>. Rețeaua este sponsorizată de Comisia Europeană, prin cel de-al șaselea Program Cadru.

**Instituțiile implicate în program sunt următoarele:**

BGR , BGS , BRGM , GEUS , Heriot Watt University , IFP , Imperial College , NIVA , OGS , IRIS , SINTEF , TNO , Sapienza University din Roma .

## Activități ale Rețelei



Cercetătorii din cadrul rețelei acționează împreună pentru a îmbunătăți cunoștințele noastre legate de stocarea geologică a CO<sub>2</sub> și instrumentele necesare pentru răspândirea ei în siguranță. Ei sunt implicați în câteva proiecte de cercetare prioritare, care se referă la fiecare aspect al problemei: roca de stocare, cap-rockul, căile potențiale de migrare a CO<sub>2</sub> spre suprafața solului, impactul potențial asupra populației și asupra ecosistemelor locale în cazul unor scăpări, precum și informarea și comunicarea cu publicul larg.

Puterea CO<sub>2</sub>GeoNet constă în abilitatea sa de a crea echipe multidisciplinare de specialiști foarte experimentați, permițând, astfel, mai bună alegere a numeroaselor aspecte ale stocării geologice și a felului în care acestea sunt conectate în cadrul unui sistem mai mare și mai complex. În afara activităților de cercetare, CO<sub>2</sub>GeoNet mai poate realiza următoarele:

- să ofere pregătirea și formarea cercetătorilor și inginerilor ce vor fi necesari pentru realizarea stocării CO<sub>2</sub>;
- să ofere consultanță științifică și audit propunerilor de proiecte (calitate geotehnică, protecția mediului, managementul riscului, programe legate de planificare și de reglementări legale etc);
- să disemineze informații independente, bazate pe rezultatele cercetărilor;
- să discute cu cei interesați și să ajute la rezolvarea problemelor și necesităților lor.

Pentru a conștientiza publicul în legătură cu stocarea geologică a CO<sub>2</sub>, ca o opțiune viabilă de reducere a intensității schimbărilor climatice, CO<sub>2</sub>GeoNet a luat în considerare întrebarea fundamentală: „Ce înseamnă, de fapt, captarea geologică a CO<sub>2</sub>?”. Un grup de cercetători, eminenți din CO<sub>2</sub>GeoNet au pregătit răspunsuri, documentate, la aceste întrebări pertinente bazate pe mai mult de un deceniu de cercetări europene și experiența proiectelor demonstrative din lumea întreagă. Scopul acestei acțiuni este de a furniza informații științifice clare și obiective unei largi audiențe și de a încuraja dialogul asupra problemelor esențiale referitoare la aspectele tehnice ale stocării geologice a CO<sub>2</sub>.

Această lucrare, prezentată în sumar în această broșură a fost introdusă în timpul primului Workshop de Scolarizare și Dialog înut la Paris pe 3 octombrie 2007. Larga audiență a inclus reprezentanți ai industriei, inginerii și cercetători, politicieni, jurnaliști, asociații neguvernamentale, sociologi, profesori și studenți.

În total, au participat 170 de persoane din 21 de țări. Ei au avut ocazia să facă schimb de opinii și să capete o înțelegere mai completă asupra stocării geologice a CO<sub>2</sub>.

Pentru informații suplimentare sau în legătură cu posibilitatea organizării unui curs similar asupra stocării geologice, vă rugăm să contactați secretariatul CO<sub>2</sub>GeoNet la [info@co2geonet.com](mailto:info@co2geonet.com) sau să accesați site-ul nostru la adresa [www.co2geonet.eu](http://www.co2geonet.eu)

# CO<sub>2</sub>GeoNet

## Rețeaua europeană de excelență pentru stocarea geologică a CO<sub>2</sub>



[www.co2geonet.eu](http://www.co2geonet.eu)

Secretariat: [info@co2geonet.com](mailto:info@co2geonet.com)

**BGS** Natural Environment Research Council-British Geological Survey, **BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **BRGM** Bureau de Recherches Géologiques et Minières, **GEUS** Geological Survey of Denmark and Greenland, **HWU** Heriot-Watt University, **IFP**, **IMPERIAL** Imperial College of Science, Technology and Medicine, **NIVA** Norwegian Institute for Water Research, **OGS** Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, **IRIS** International Research Institute of Stavanger, **SPR SINTEF** Petroleumsforskning AS, **TNO** Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, **URS** Sapienza University of Rome Dip. Scienze della Terra.



Versiunea în limba română a broșurii CO<sub>2</sub>GeoNet a fost realizată de Asociația "Clubul CO<sub>2</sub>" ([www.co2club.ro](http://www.co2club.ro)) împreună cu Institutul Național de Cercetare - Dezvoltare pentru Geologie și Geoecologie Marină ([www.geocomar.ro](http://www.geocomar.ro)).

