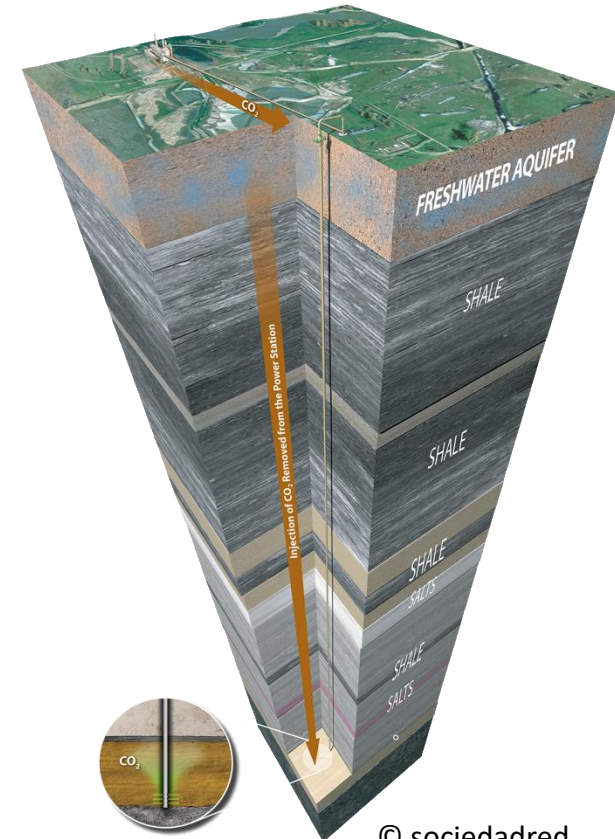


Le projet ELEGANCY au laboratoire du Mont Terri: quelle contribution pour le stockage du CO₂ dans le sous-sol?

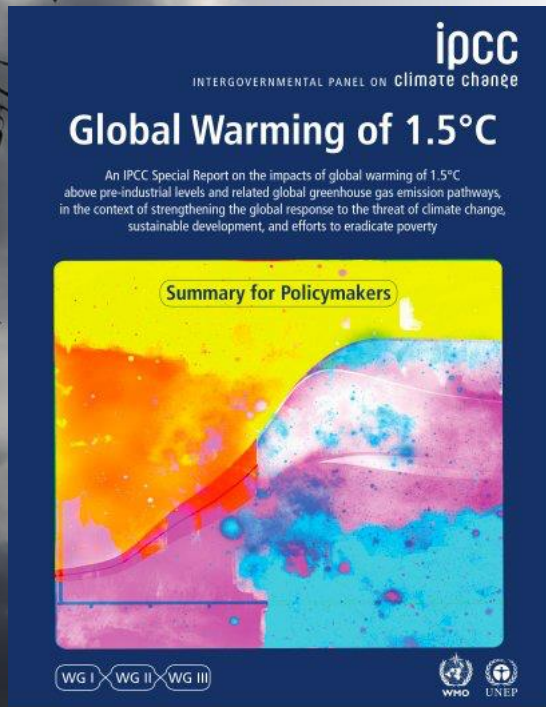
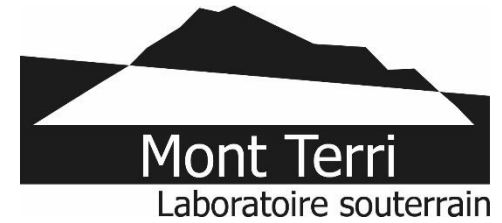
Dr Christophe Nussbaum

Service géologique national **swisstopo**

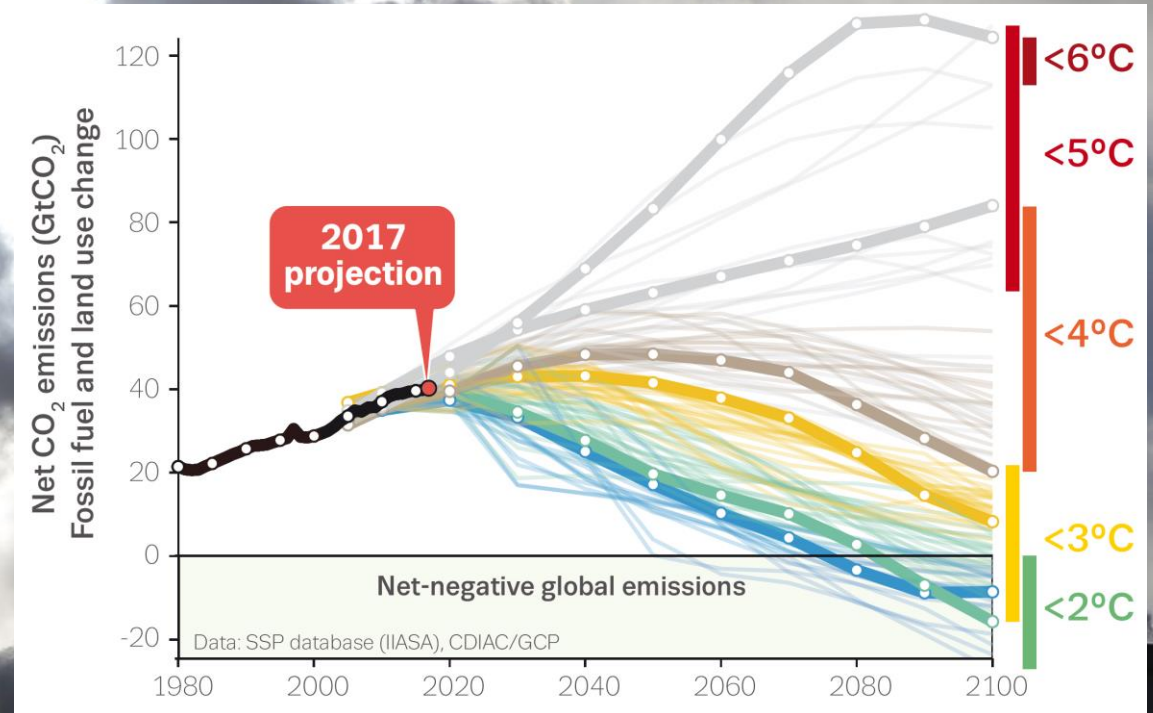




Le problème du CO₂



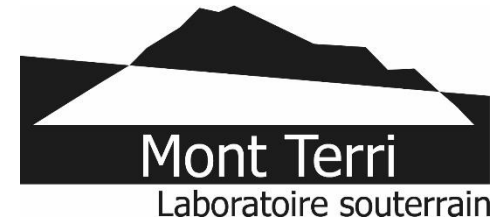
© www.ipcc.ch



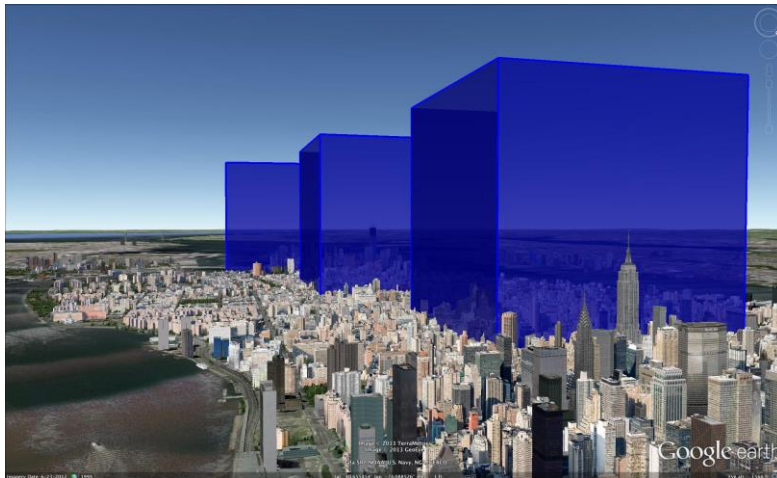
© Global Carbon Project



Énormément de CO₂ !



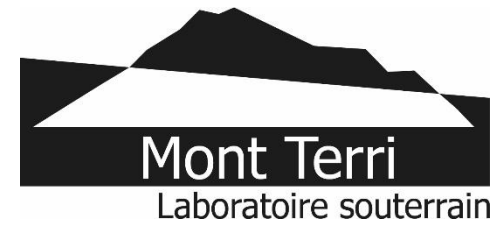
- 38 gigatonnes de CO₂ émis en 2018 dans le monde
- 1 gigatonne = 1 milliard de tonnes = 10^9 tonnes = 10^{12} kilogrammes = 400 000 piscines = 1 cube d'un km de longueur d'arête¹.
- **En Suisse:** 50 millions de tonnes (= 50 cubes de 100 m de côté)
- **Chaque Suisse:** 5,8 tonnes
Ma famille: environ 23 tonnes, soit plus ou moins un demi-camion-citerne.



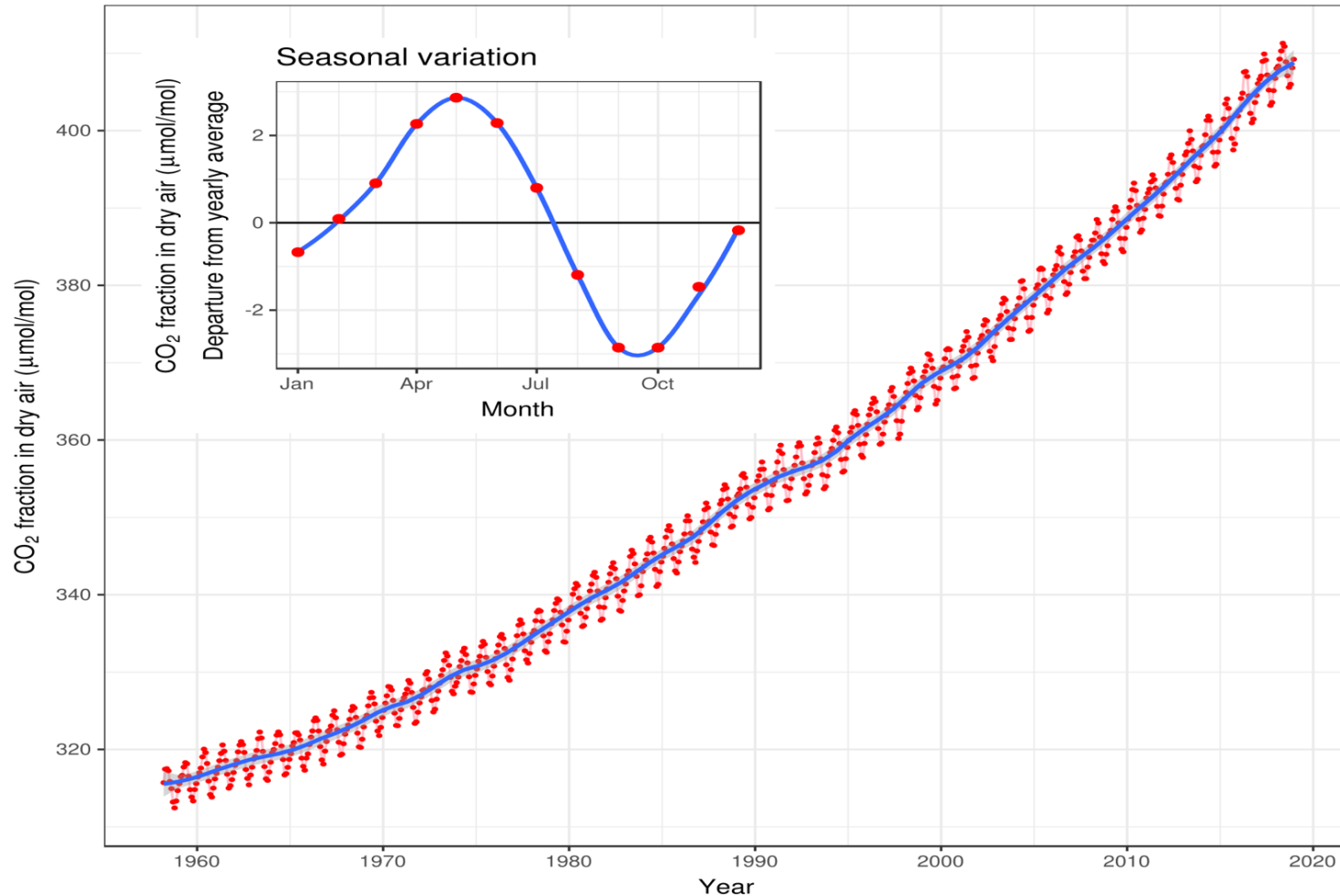
¹ Dans un aquifère, le CO₂ a une densité de 700 kg/m³



La concentration de CO₂ dans l'atmosphère augmente



Monthly mean CO₂ concentration
Mauna Loa 1958 - 2018



Data : R. F. Keeling, S. J. Walker, S. C. Piper and A. F. Bollenbacher
Scripps CO₂ Program (<http://scrippsco2.ucsd.edu>). Accessed 2019-01-06



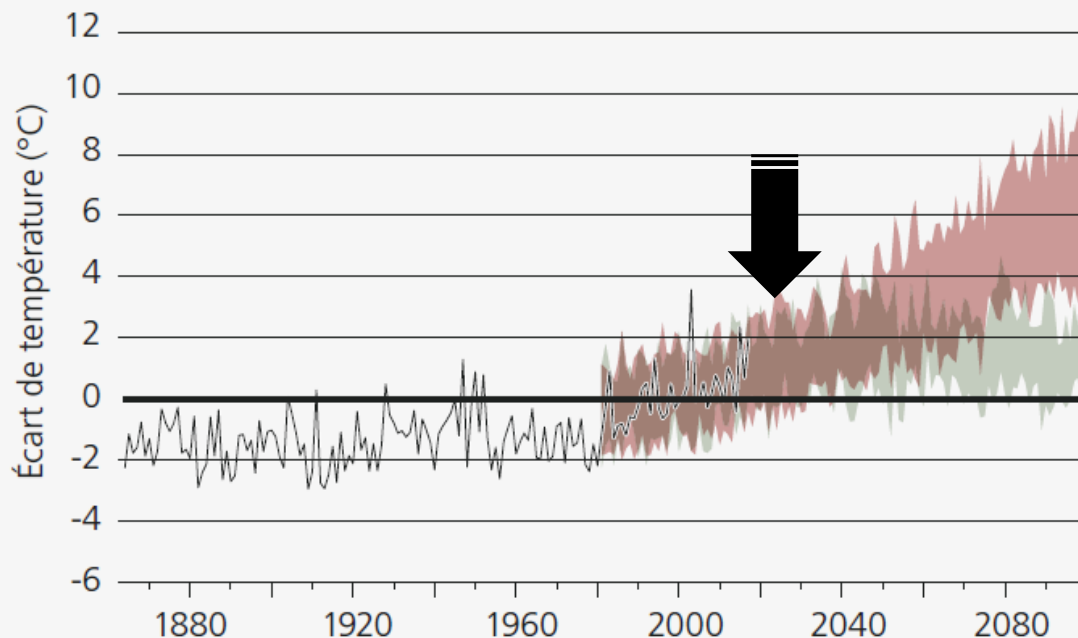
Et par conséquent, le climat évolue: dans le monde entier et donc également en Suisse



Températures estivales moyennes

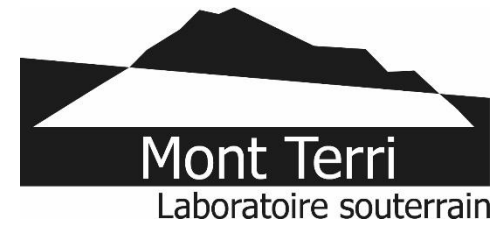
Écart de la moyenne suisse par rapport à la moyenne des années 1981–2010

- Mesure
- Changement possible **avec** des mesures de protection du climat (plage des valeurs possibles sur l'ensemble des simulations)
- Changement possible **sans** mesures de protection du climat (plage des valeurs possibles sur l'ensemble des simulations)

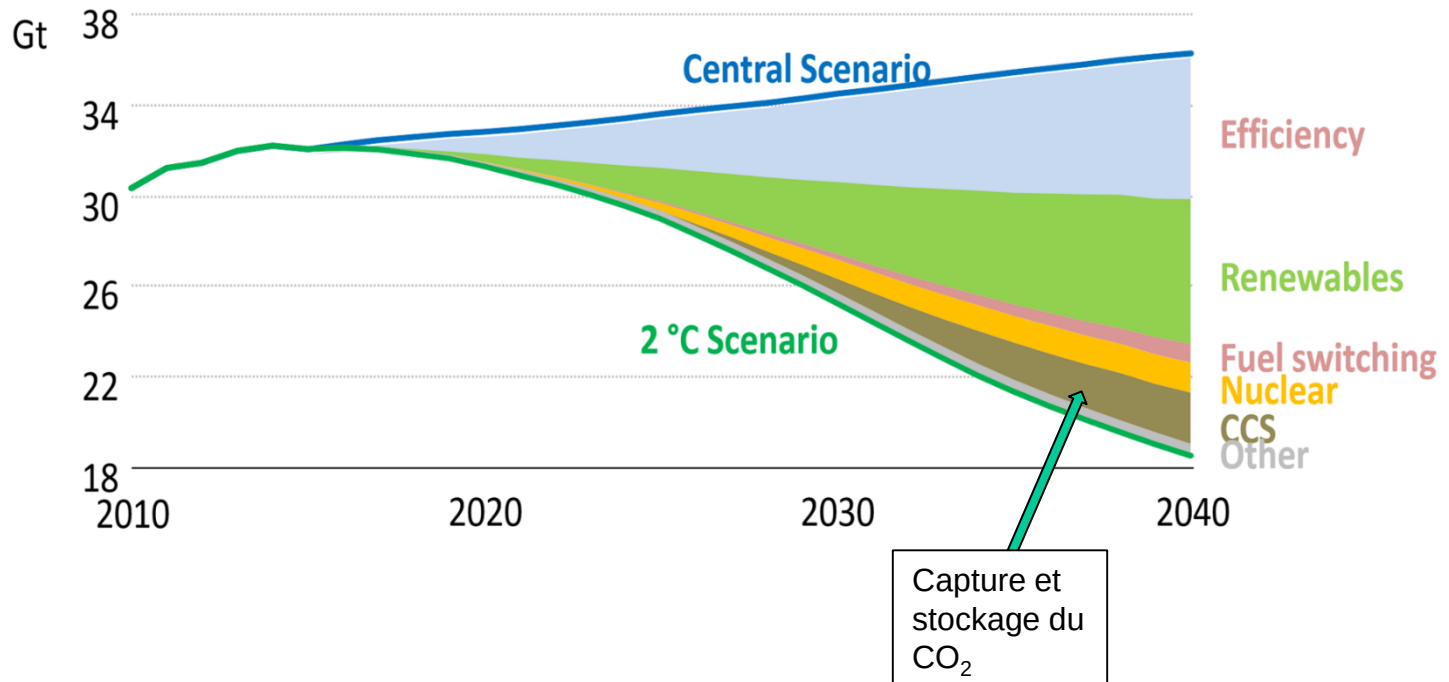




Pourquoi stocker le CO₂ dans le sous-sol?



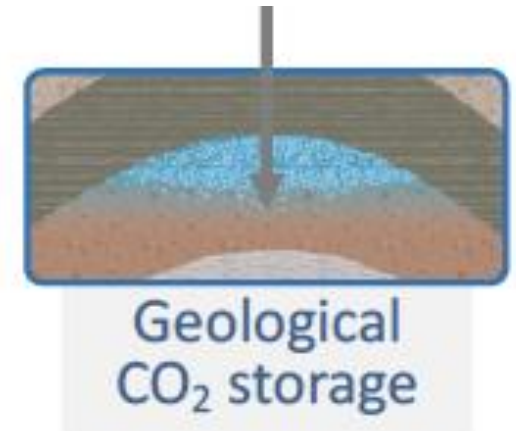
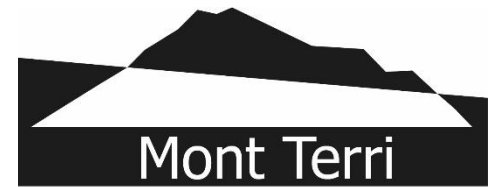
Global CO₂ emissions reductions in the Central & 2 °C Scenario by technology





Où mettre tout ce CO₂ ?

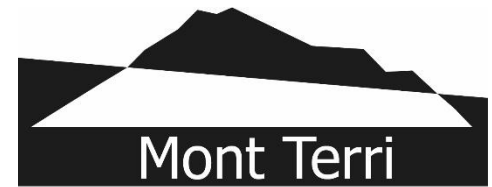
- Il faut l'éviter !
→ énergies renouvelables
- Capturer le CO₂ lors de la combustion, et
 - l'utiliser (*Carbon Dioxide Capture and Utilization, CCUS*).
 - le séquestrer (*Carbon dioxide Capture and Storage, CCS*).
- Extraire le CO₂ de l'atmosphère.
Cela semble judicieux pour le « **CO₂ inévitable résiduel** » (p. ex. voyages aériens)
(*CDR Carbon Dioxide Removal*)
 - Capture directe dans l'air avec séquestration du carbone
 - Bioénergie avec capture du carbone et séquestration
 - Carburant hydrogène avec séquestration du CO₂





Les émissions négatives

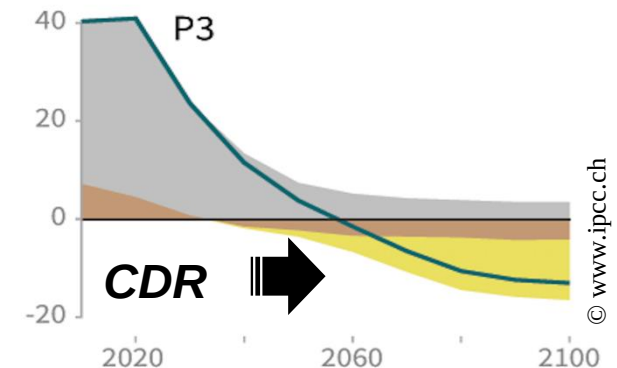
- CDR (*Carbon Dioxide Removal*) un pas vers les « émissions négatives » (**NET** : Negative Emission Technologies)
- En principe, il est possible soit d'éviter d'émettre le CO₂ dans l'atmosphère, soit de l'en extraire à nouveau (la nature fait ça en continu, Climeworks aussi).
- Les NET jouent un rôle important dans tous les scénarios climatiques à partir de 2040 à 2050 pour atteindre l'**objectif 2 degrés** (voire même 1,5 degré).
- Les technologies de capture du CO₂ doivent être accompagnées par la capacité de séquestrer en permanence dans le sous-sol de grandes quantités de CO₂, de manière sûre et à des coûts raisonnables.
- Le carbone est donc remis à l'endroit d'où il vient, les couches terrestres, à une profondeur de 1 à 5 km.



© www.climeworks.com



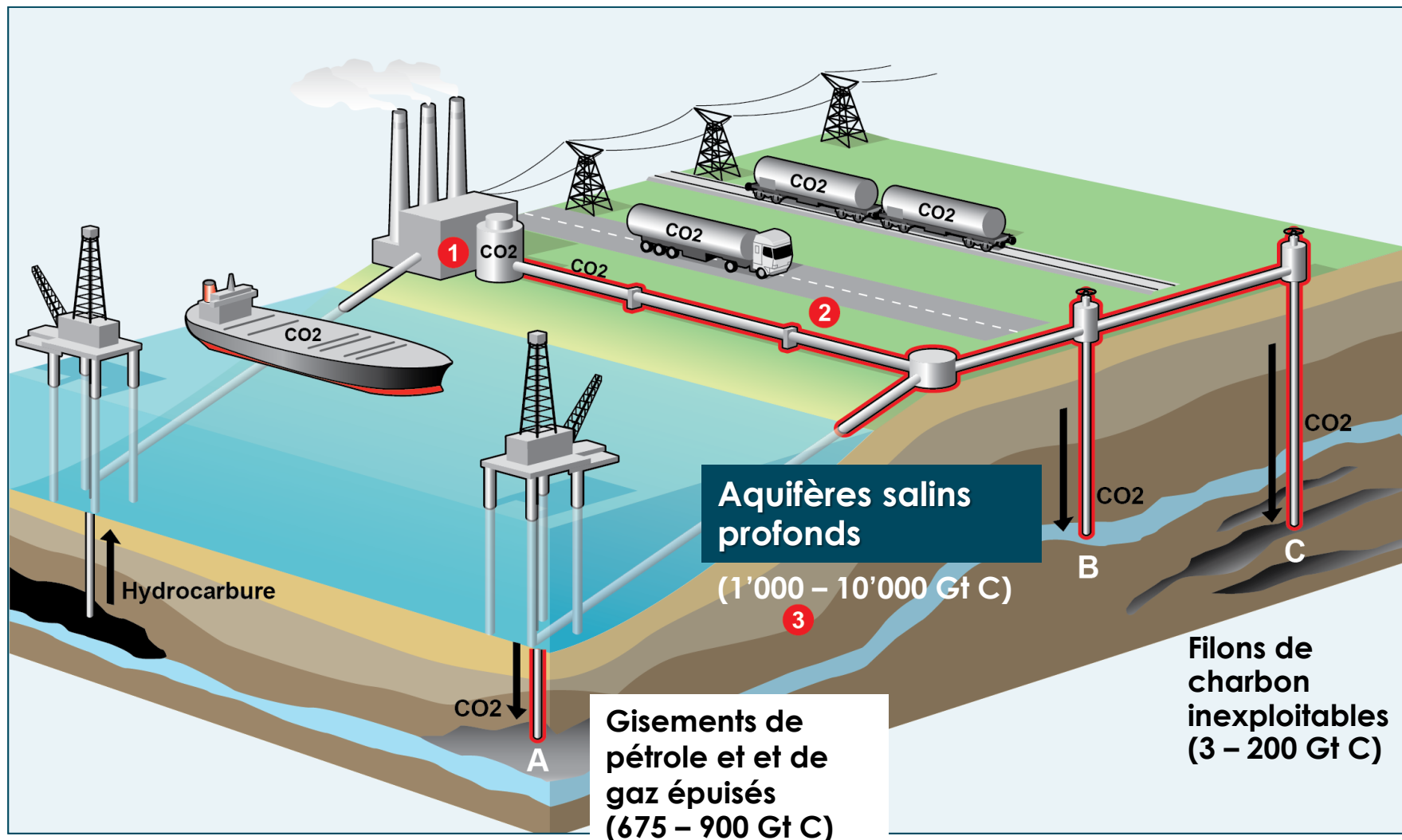
Billion tonnes CO₂ per year (GtCO₂/yr)





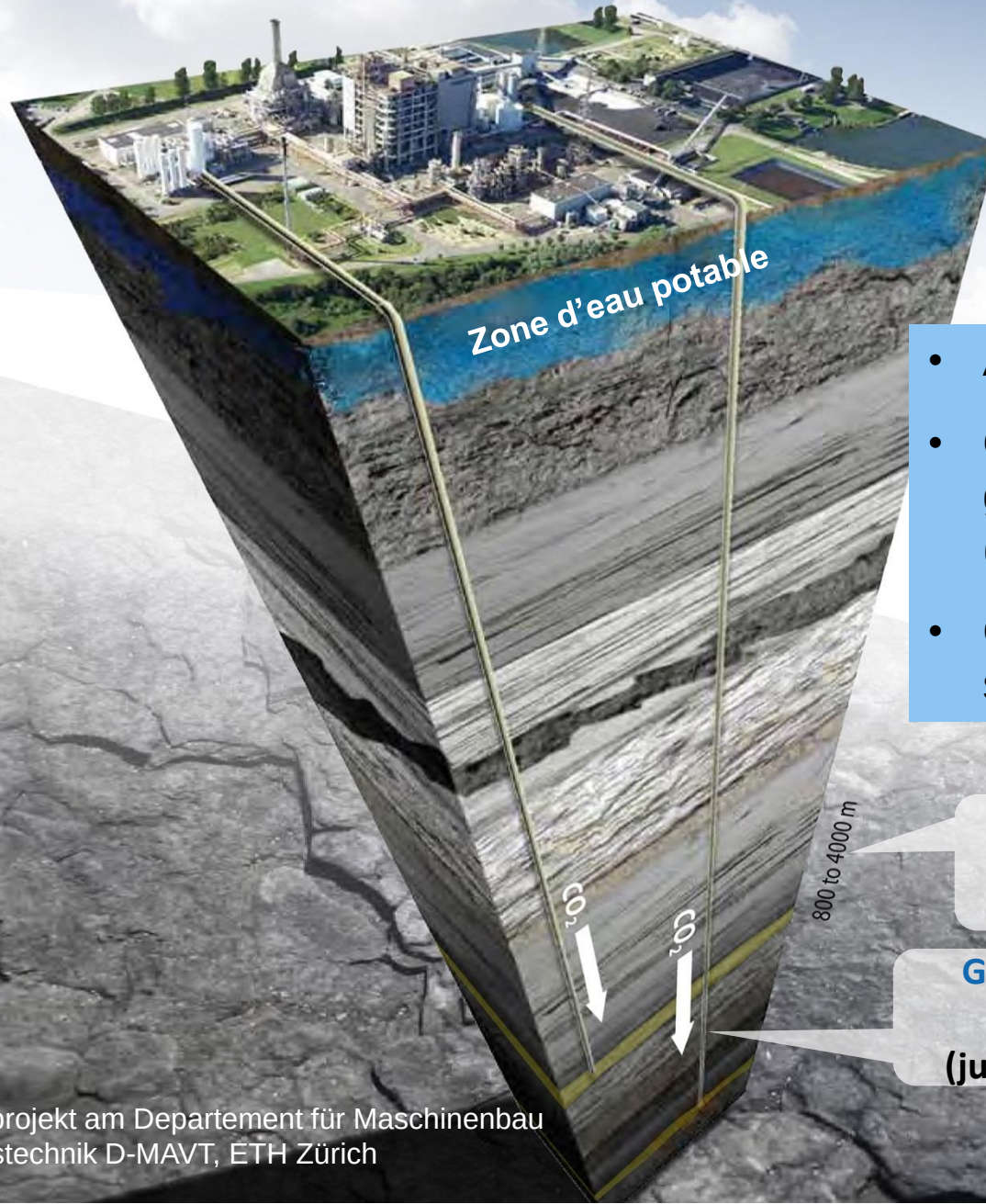
Capture et stockage du CO₂ (CCS)

Comprend la **capture du CO₂** aux points sources de production, cimenteries et centrales électriques au charbon, puis **injection et stockage** dans des gisements de pétrole et de gaz épuisés, aquifères salins profonds, ou dans des filons de charbon inexploitable



Stockage géologique du CO₂

© PCOR Atlas 2012



Zone d'eau potable

- Aquifères salins profonds
- Gisements pétroliers et de gaz épuisés (offshore/onshore)
- Gisements de charbon, schistes, basaltes

Aquifères salins profonds
(800 m jusqu'à 2'500 m)

Gisements pétroliers et de gaz épuisés
(jusqu'à 5'000 m de profondeur)



Le CO₂ diminue de volume avec son enfouissement en profondeur

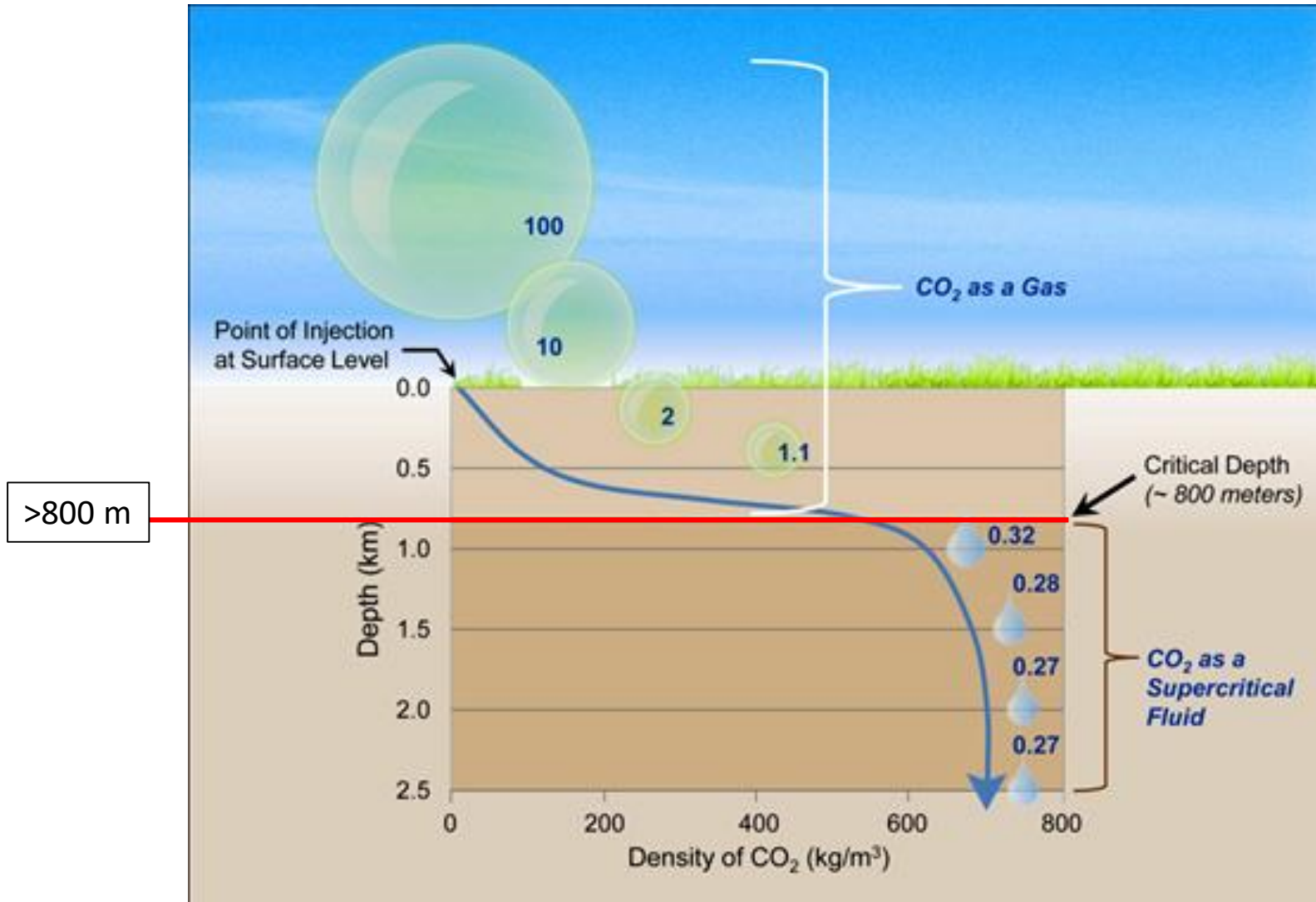
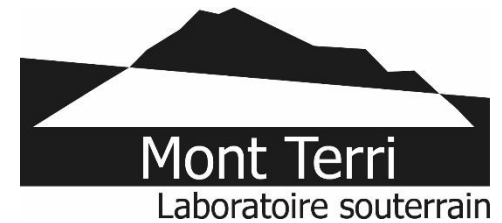
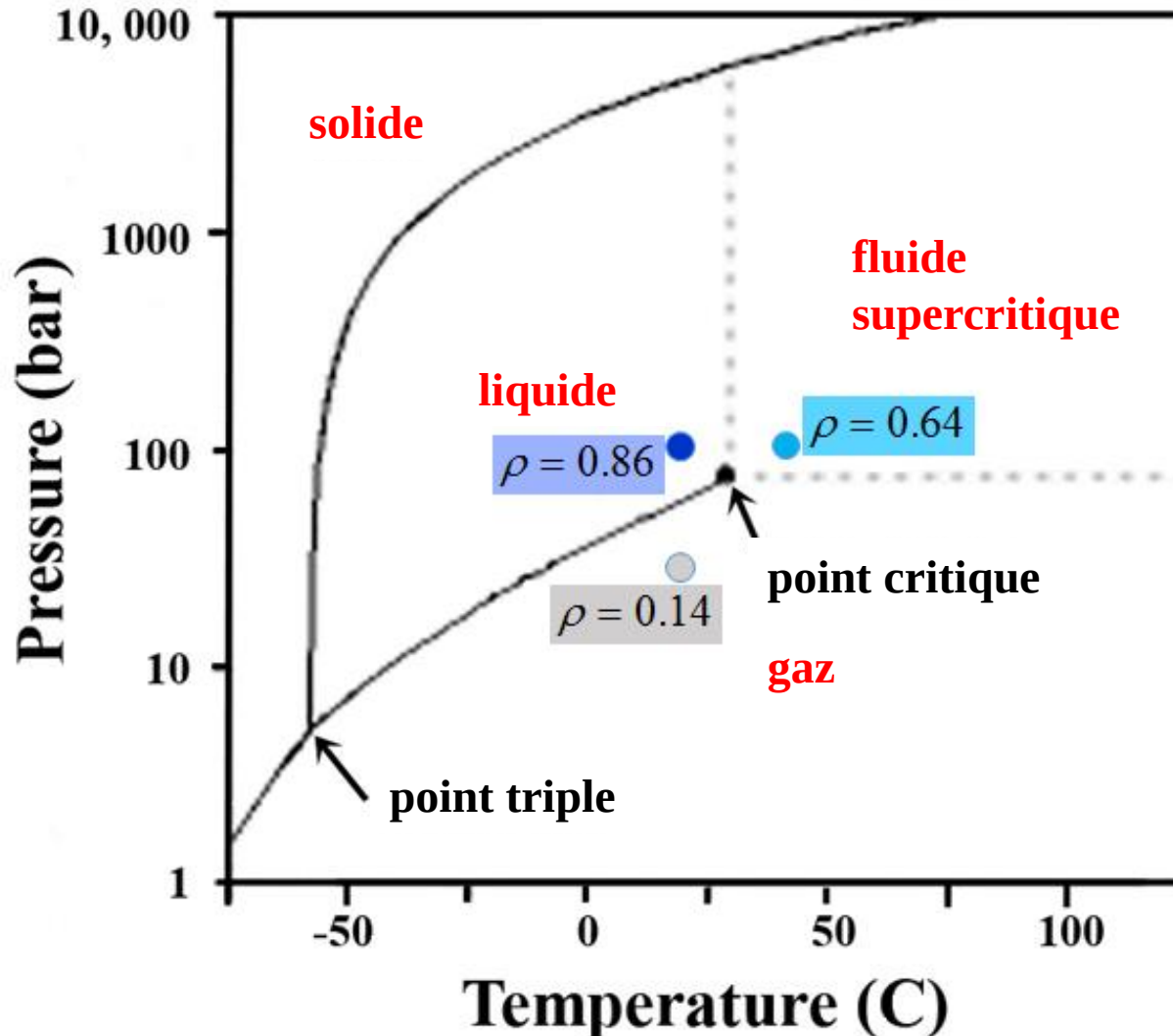
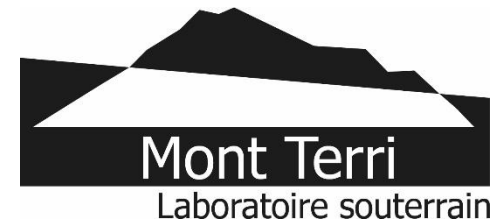




Diagramme de phase du CO₂

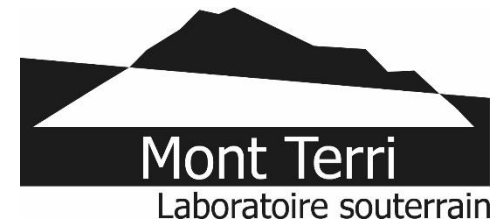
À plus de 800m de profondeur le CO₂ se trouve à l'état supercritique

température > 31.1 °C, pression > 7.4 MPa, densité > 600 kg/m³

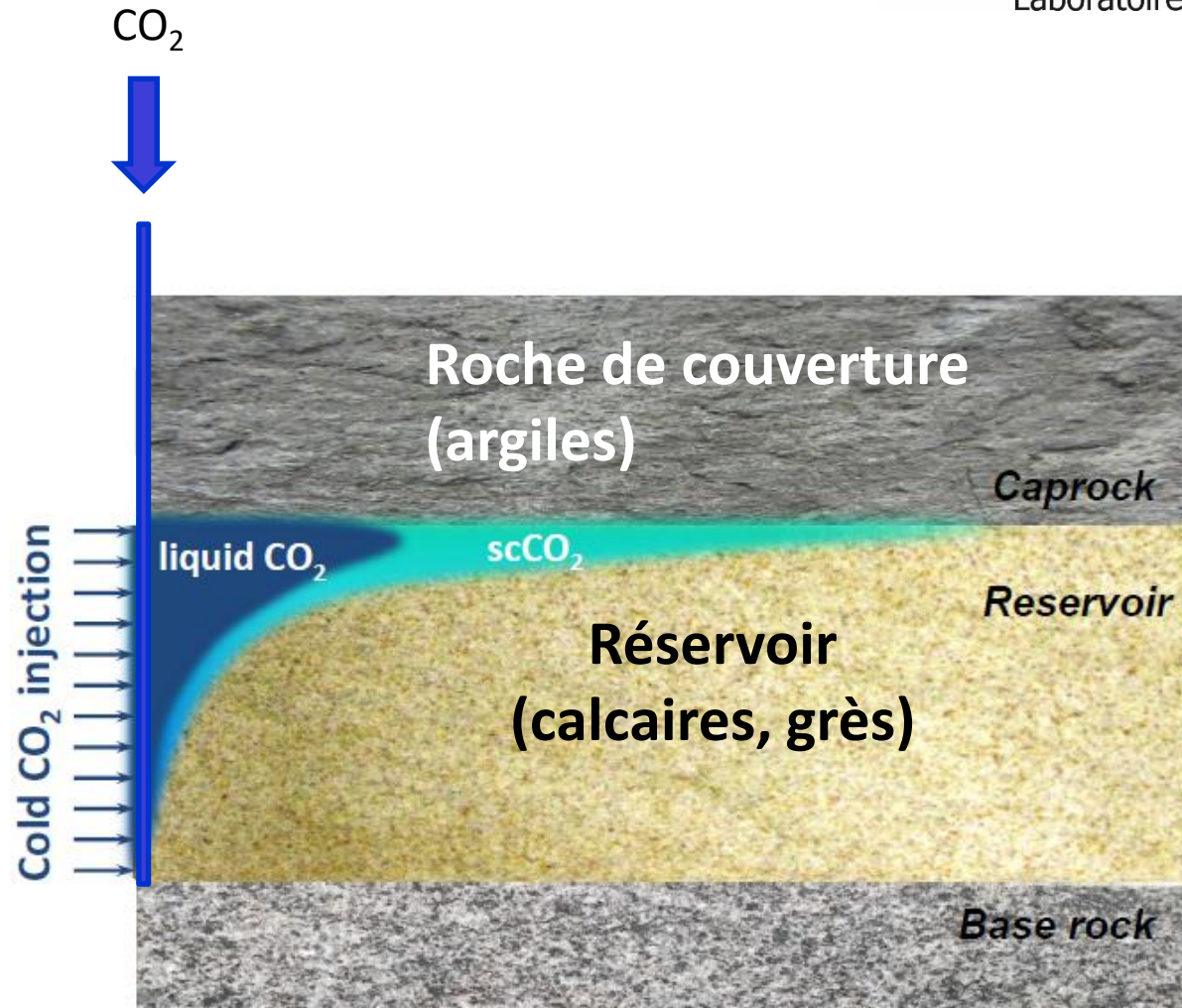




Le couple “roche de couverture-réservoir”

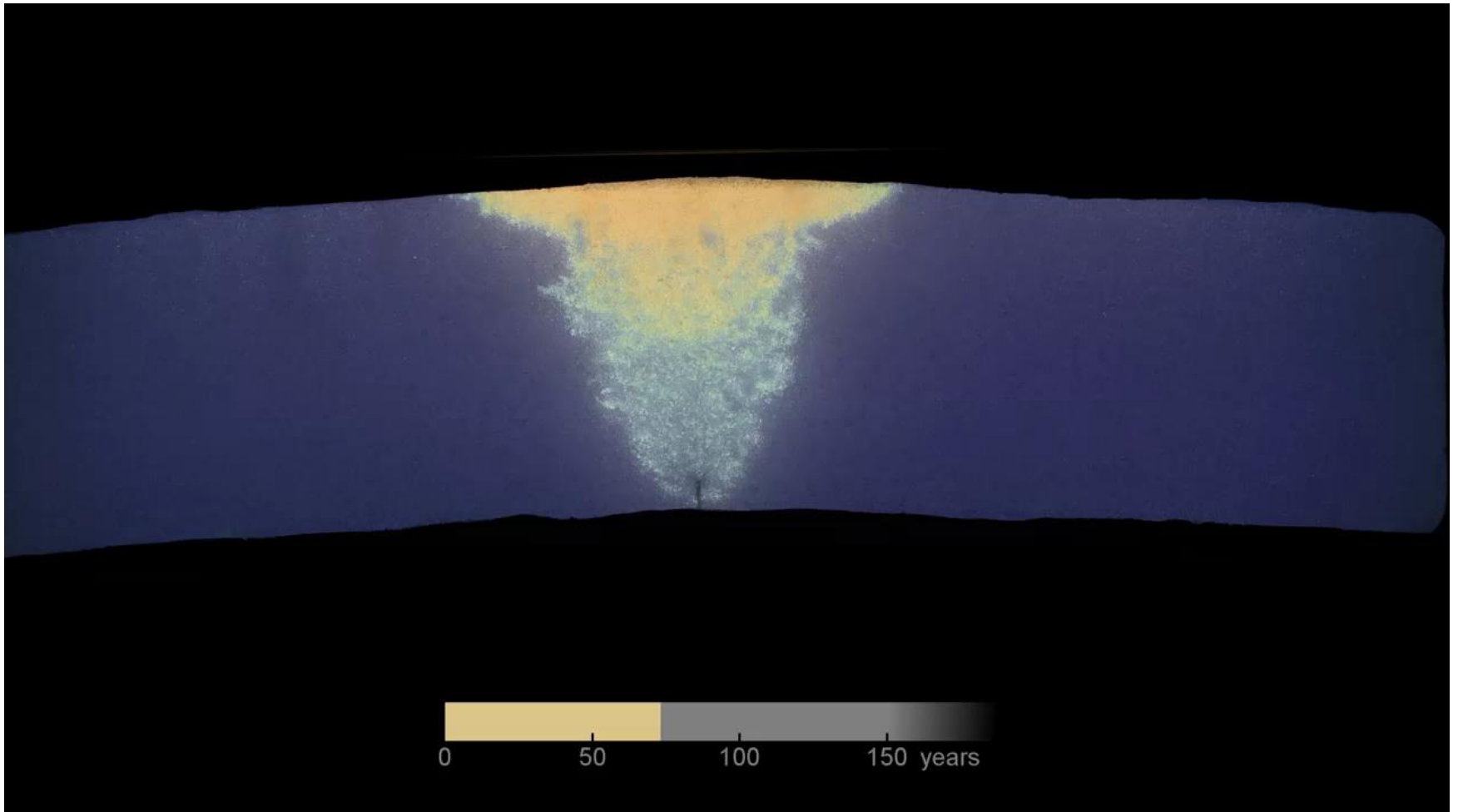
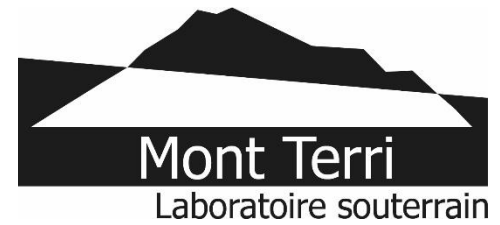


- Réservoir = roches perméables et poreuses
- >800 m de profondeur roches saturées en eaux non potables





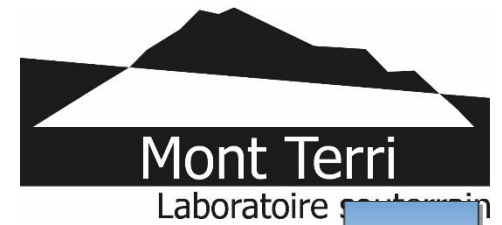
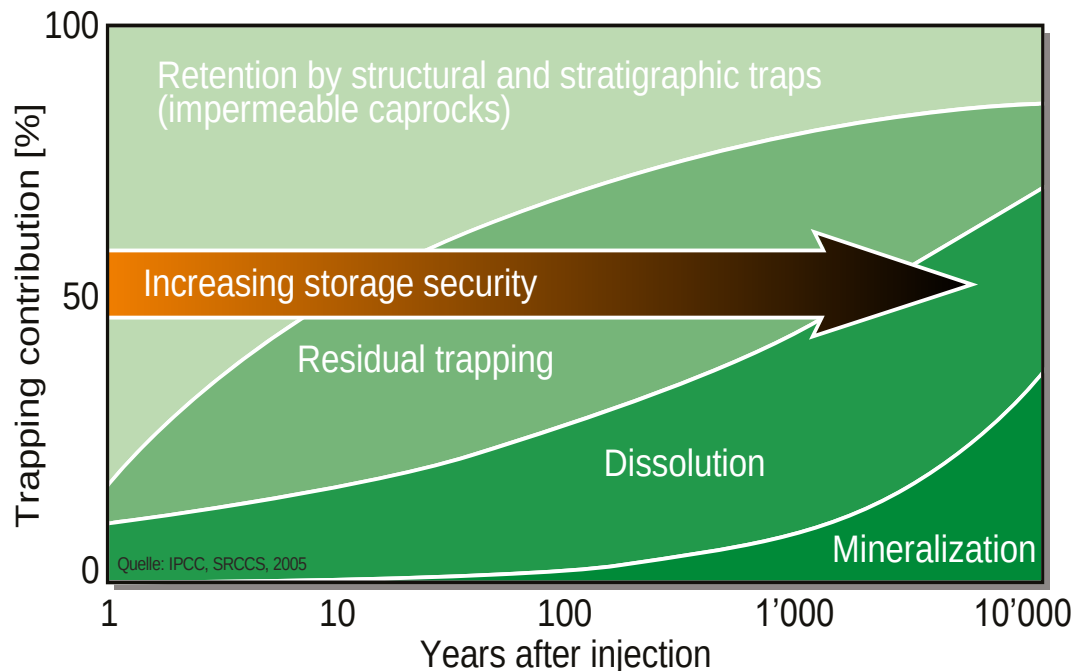
Le couple “roche de couverture-réservoir”



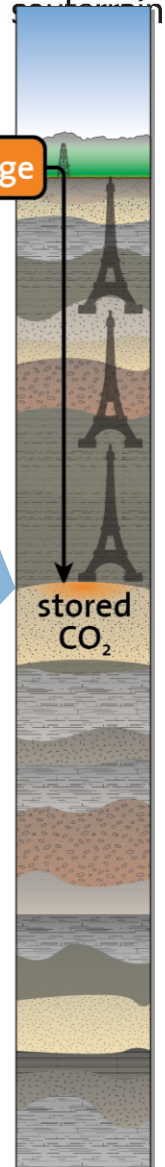
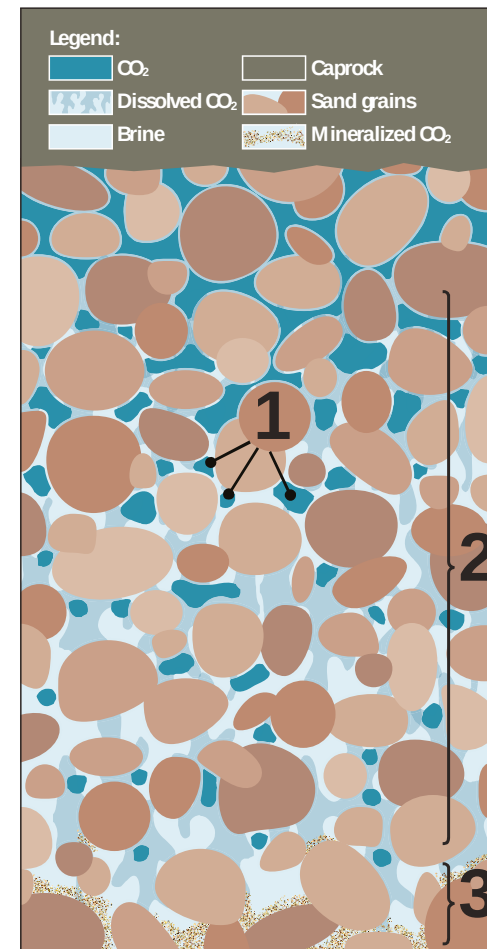


Comment se comporte le CO₂ dans la roche ?

Après un certain temps, le CO₂ liquide «supercritique» se transforme en eau minérale salée et en minéraux solides

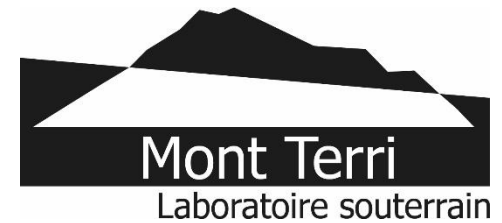


CO₂ geostorage

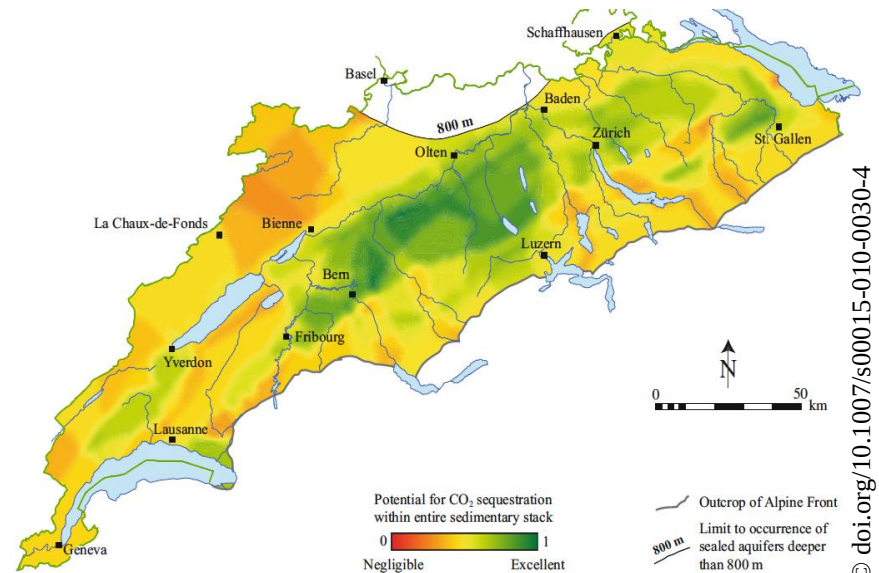
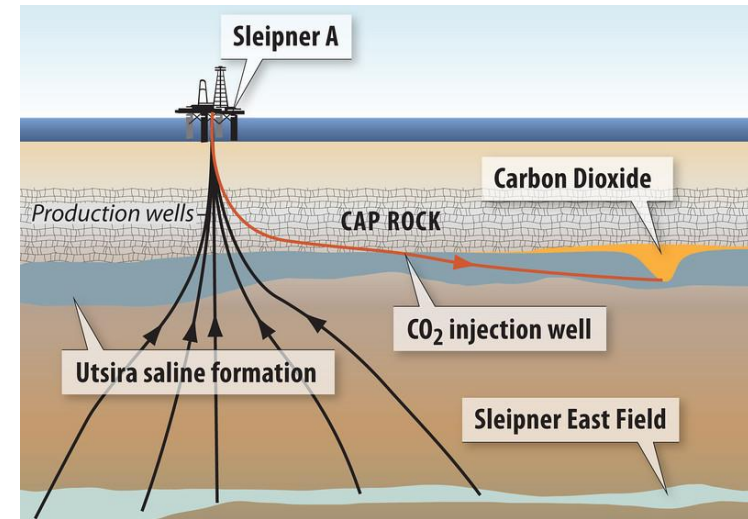




Le stockage géologique du CO₂ dans le monde. Et en Suisse?



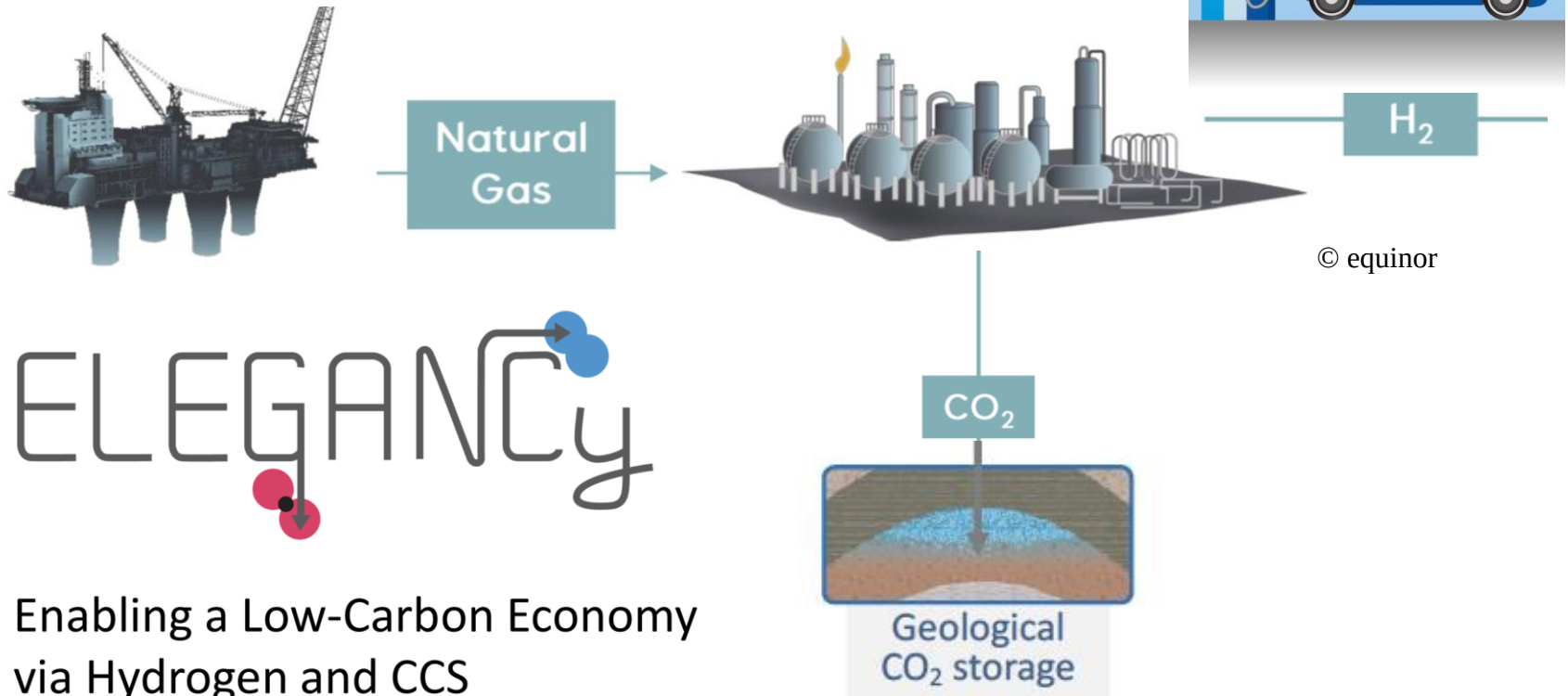
- Etudié dans le monde entier depuis des années
- Plusieurs installations en exploitation, permettant de séquestrer chaque année de 1 à 3 millions de tonnes de CO₂ (par exemple Sleipner, Mer du Nord, 17 millions de tonnes à ce jour).
- Peu d'études en Suisse et des questions importantes en suspens
- A priori, un potentiel de stockage existe sous le plateau suisse, à vérifier par des études approfondies



Chevalier *et al.*, 2010



Le projet ELEGANCY: du gaz à l'hydrogène sans CO₂



Enabling a Low-Carbon Economy
via Hydrogen and CCS

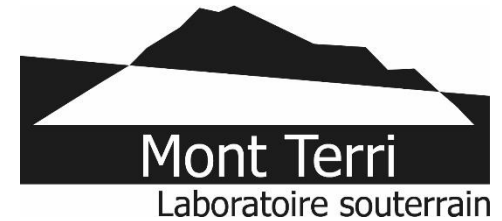
→ ELEGANCY

un projet commun européen avec le
soutien de l'Office fédéral de l'énergie

Gestion de projet en Suisse:
Prof. Marco Mazzotti (EPFZ)

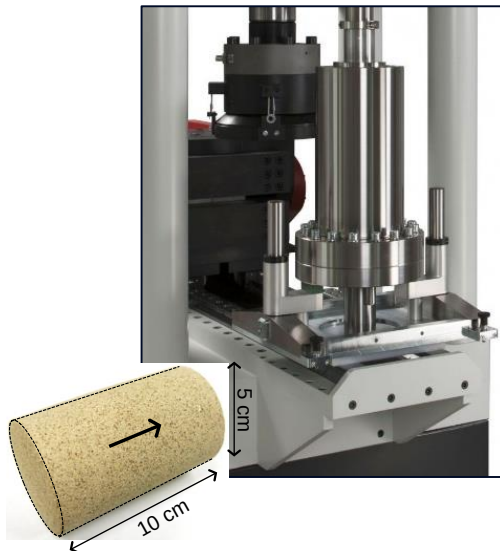


Pourquoi au Mont Terri?

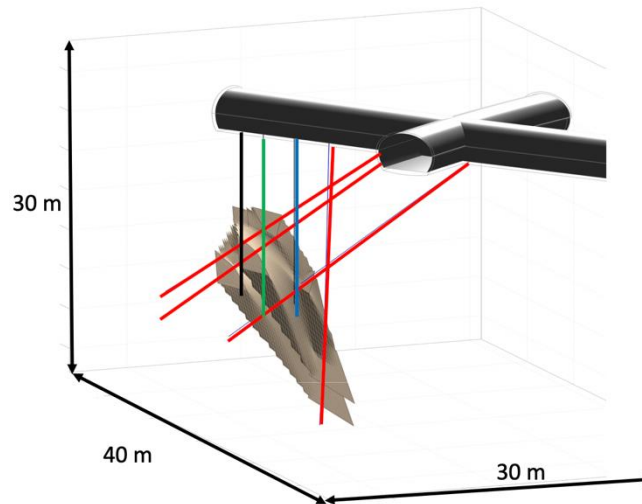


- Conditions typiques à la Suisse
- Le laboratoire souterrain offre une échelle intermédiaire idéale entre les tests sur échantillons et un site réel de stockage
- Les processus peuvent être étudiés en détails à l'échelle du laboratoire souterrain

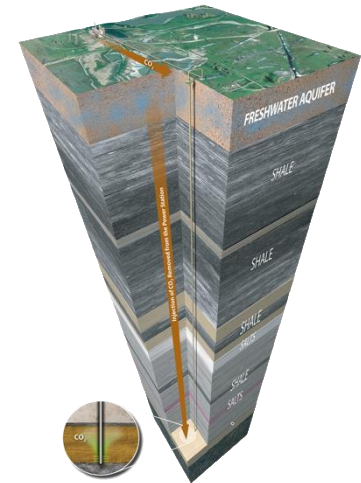
Échelle centimétrique



Échelle décamétrique



Échelle kilométrique





Les Partenaires du Consortium Mont Terri



swisstopo nagra . ENSI



nwmo
NUCLEAR WASTE
MANAGEMENT
ORGANIZATION



BGR

GRS

HELMHOLTZ
SPITZENFORSCHUNG FÜR
GROSSE HERAUSFORDERUNGEN



enresa



ANDRA
la maîtrise des déchets radioactifs

TOTAL

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE



Radioactive Waste
Management

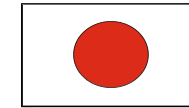


Chevron



SCK•CEN
STUDIECENTRUM VOOR KERNENERGIE
CENTRO STUDIUM DI ENERGIA NUCLEARE

FANC



IR

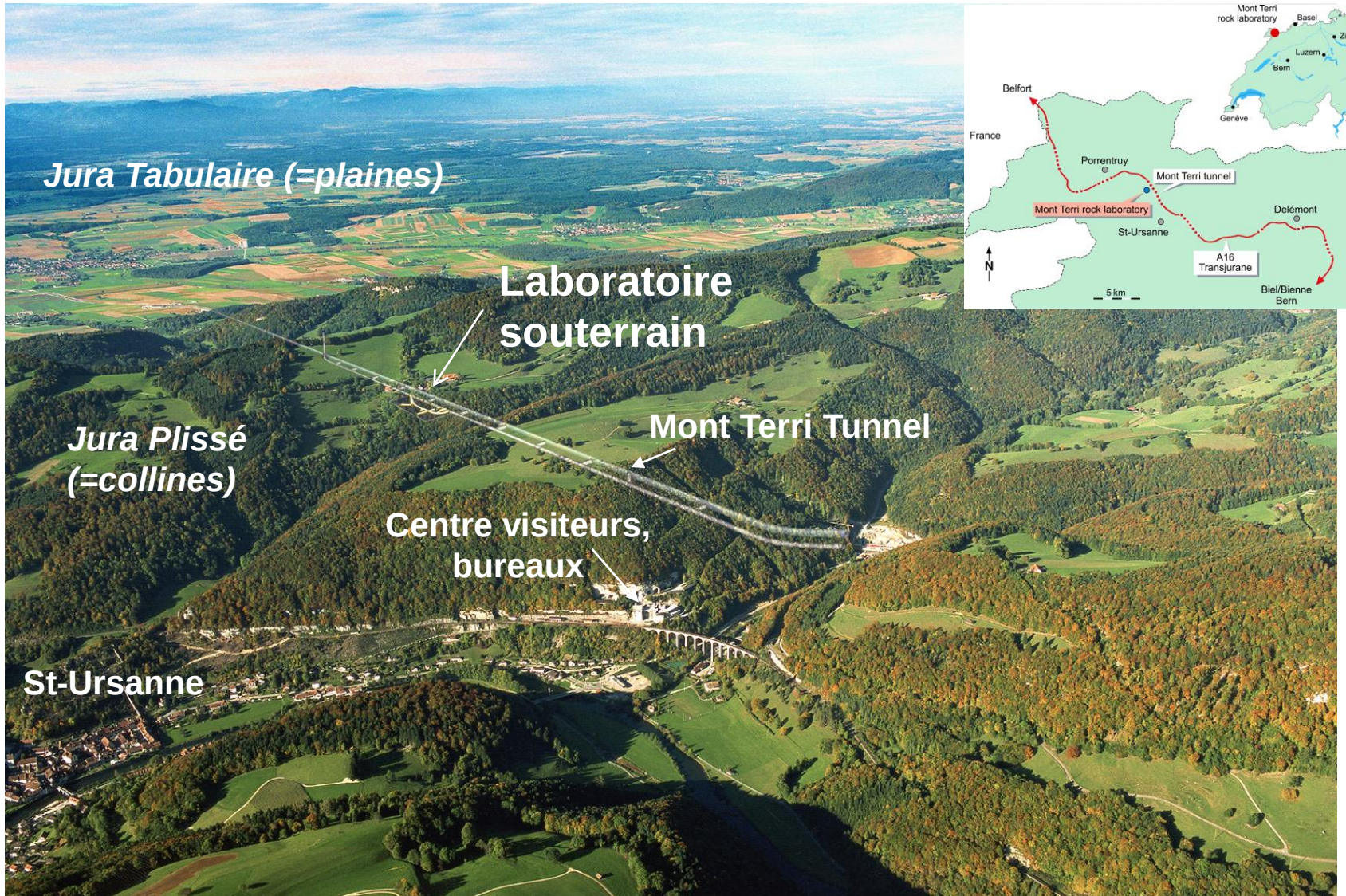
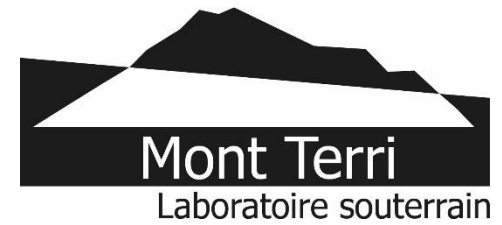
OYASHI

JAEA

- Agences de gestions des déchets et organisations de surveillance
- Services géologiques nationaux et compagnies pétrolières
- Un réseau de plus de 1000 scientifiques, ingénieurs et techniciens
- EPFZ: partenaire à partir de 2019

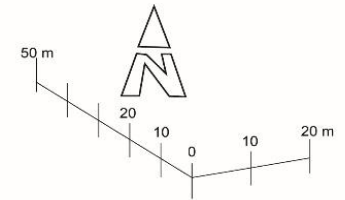
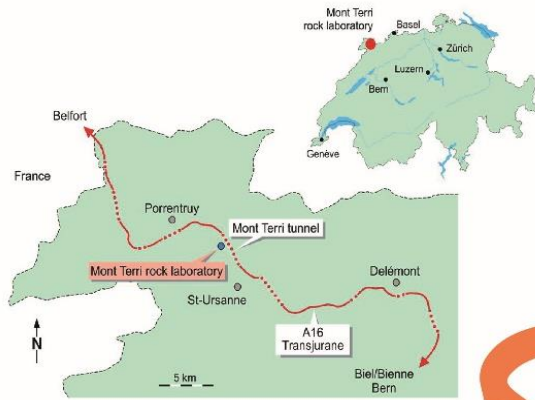
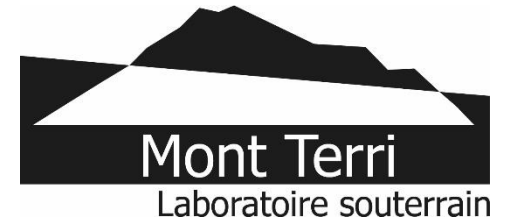


Où se trouve le laboratoire souterrain du Mont Terri?



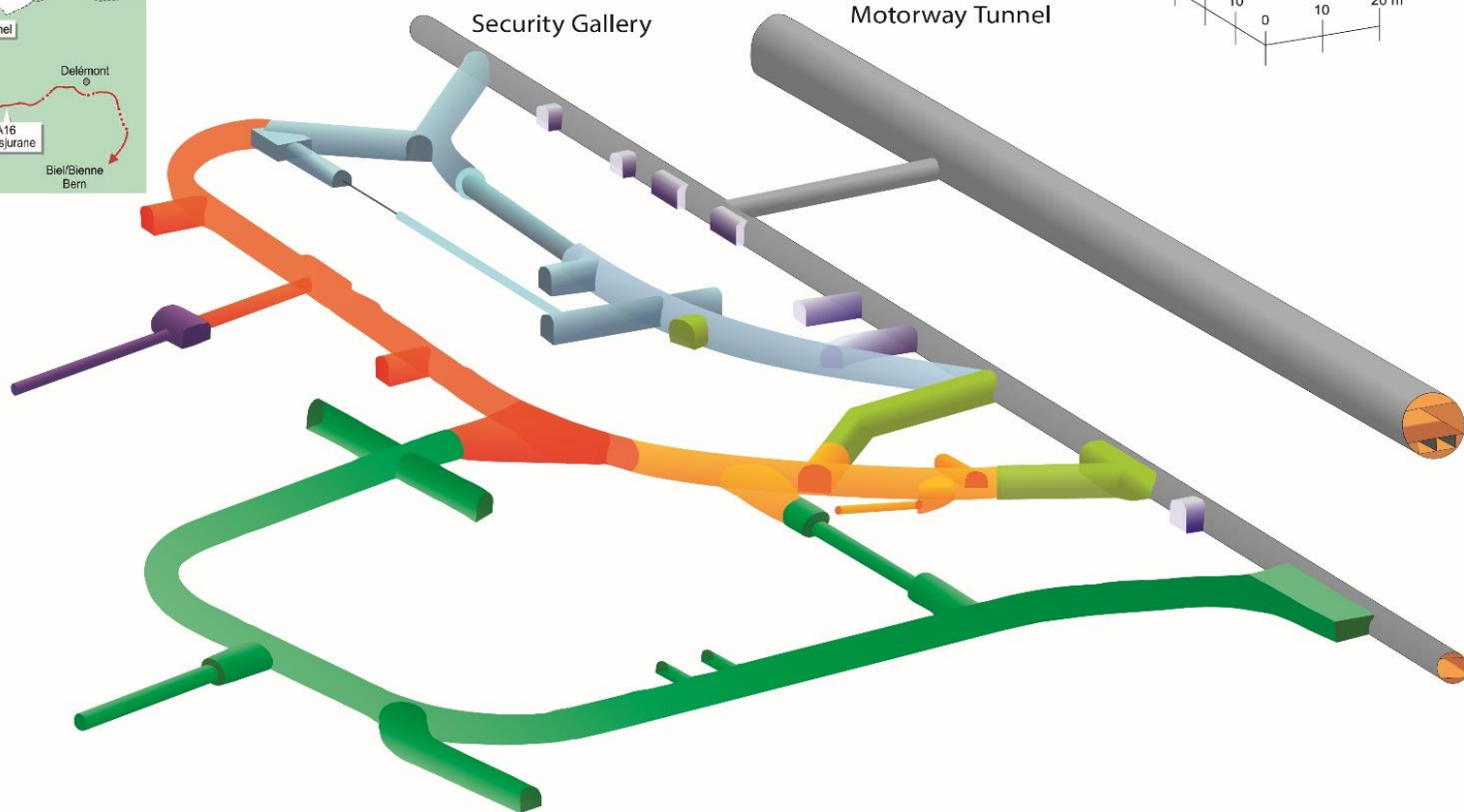


Plan du laboratoire du Mont Terri



Construction Phases
Rock Laboratory

- 2018
- 2012
- 2008
- 2004
- 2003
- 1998
- 1996





Le projet Mont Terri en bref



- Le projet Mont Terri est une plate-forme d'échanges scientifiques et technologiques pour les sites de dépôt (déchets radioactifs, séquestration de CO₂) dans les formations argileuses.
- Coopération internationale: Réseau actif entre scientifiques, ingénieurs, techniciens et directeurs de projets des 19 partenaires du Mont Terri. Partage des connaissances et des coûts.
- Le laboratoire du Mont Terri contribue considérablement à la sécurité et à démontrer la faisabilité technique d'un futur site de dépôt (déchets radioactifs, CO₂).



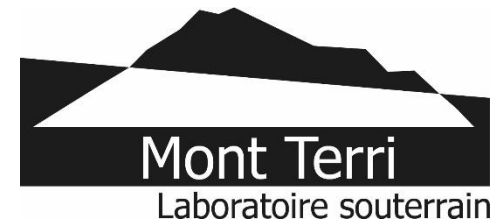
Quels sont les avantages du laboratoire souterrain?



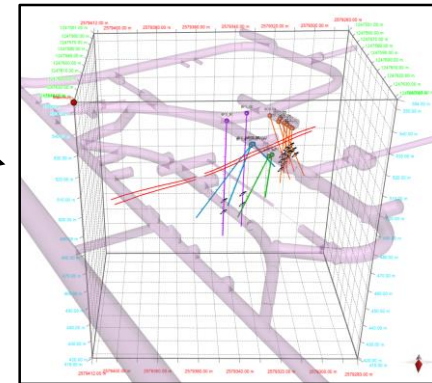
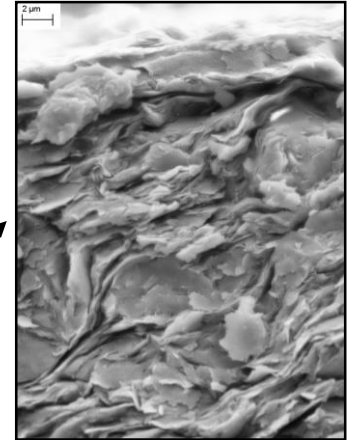
- Le laboratoire souterrain offre un lieu unique pour caractériser une roche de couverture (argiles à Opalinus). Les laboratoires permettent d'obtenir des résultats à une échelle représentative (1-100 m) et de les comparer aux essais réalisés sur échantillons en laboratoire de surface (mm-cm)
- Plus de 20 ans d'expériences au Mont Terri (recherche sur les déchets radioactifs), accumulation significative de données et de connaissances sur les propriétés des argiles et les processus dominants
- Les expériences de recherche menées au Mont Terri sont génériques, il n'y aura jamais de stockage (nucléaire/CO₂) sur ce site, ni dans la région



Objectifs des expériences CO₂ au Mont Terri

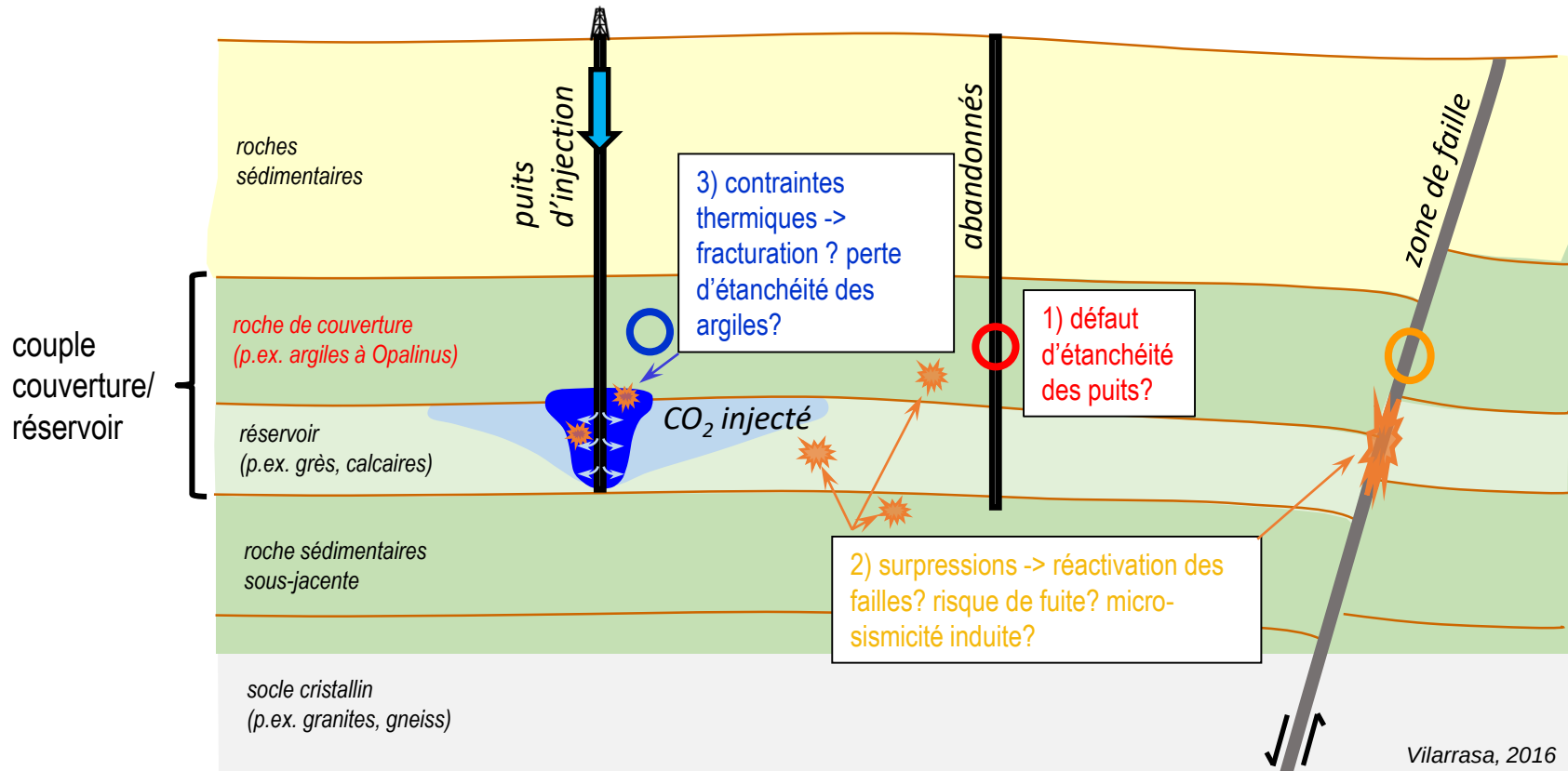
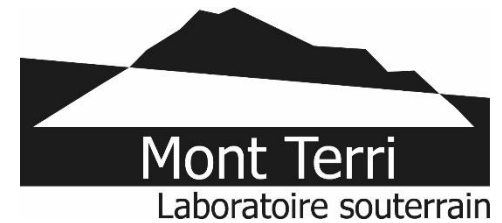


- Améliorer notre connaissance sur les processus et mécanismes contrôlant l'étanchéité des roches de couverture dans le contexte du stockage géologique de CO₂
- Vérifier et démontrer si les roches de couverture sont-elles vraiment imperméables à la migration de CO₂?
- Réaliser dans le laboratoire souterrain des expériences contrôlées à l'échelle décimétrique
- Utiliser les argiles à Opalinus comme roche de couverture référence pour la Suisse





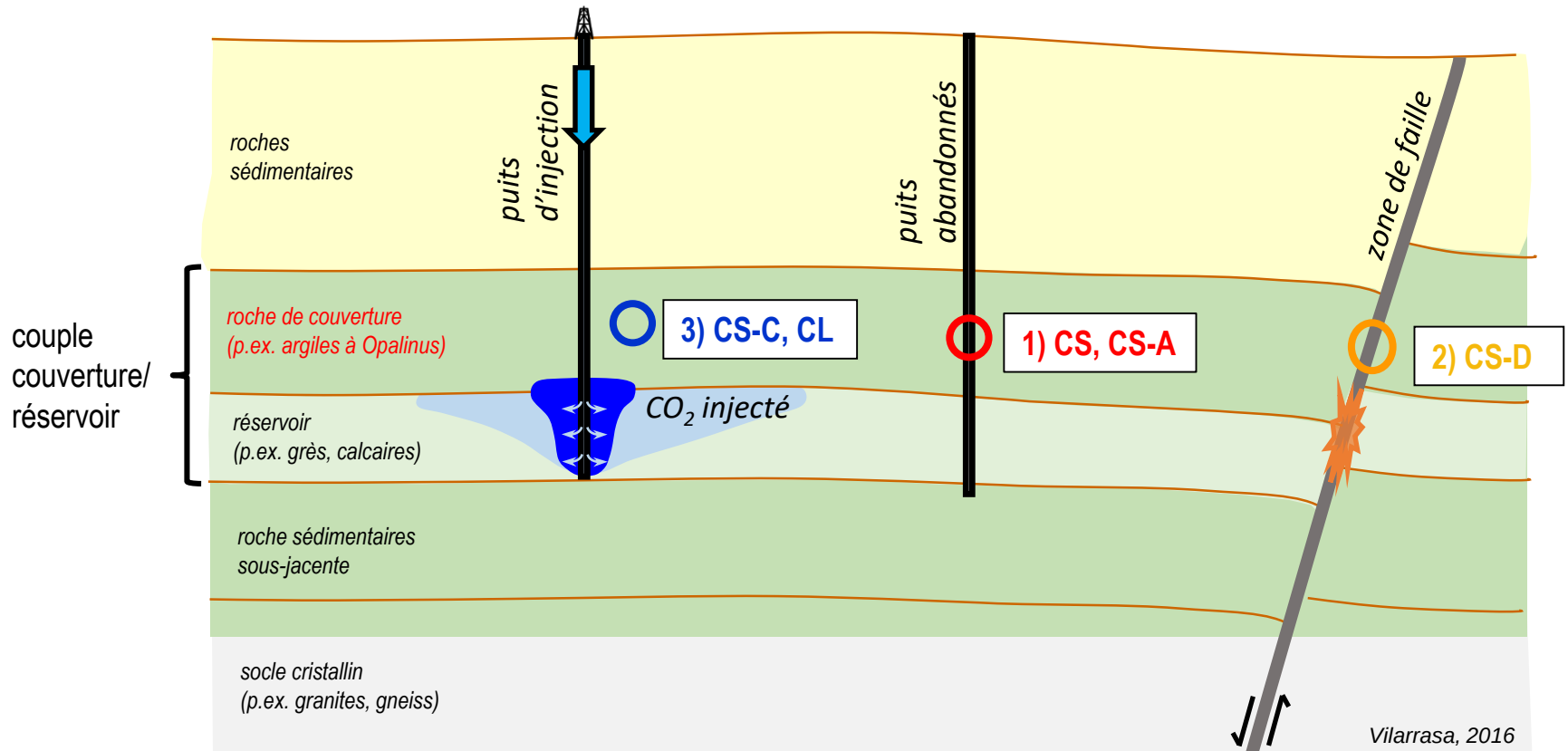
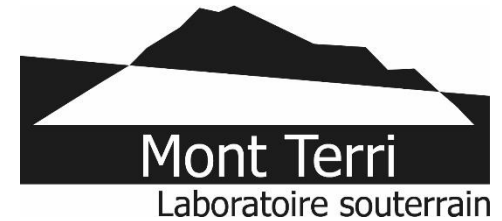
Le stockage géologique de CO₂ dans le sous-sol: quels sont les risques?



- Les dangers potentiels proviennent d'éventuelles fuites massives et brutales de CO₂ hors du réservoir: est-ce le CO₂ enfoui va-t-il remonter et atteindre la biosphère et l'atmosphère?
- Est-ce que les fuites de CO₂ peuvent-elles contaminer les eaux souterraines potables?
- Y'a-t'il un risque de sismicité lié à l'injection de CO₂ dans le réservoir?



Les expériences du Mont Terri dans le contexte du stockage géologique de CO₂



Vilarrasa, 2016

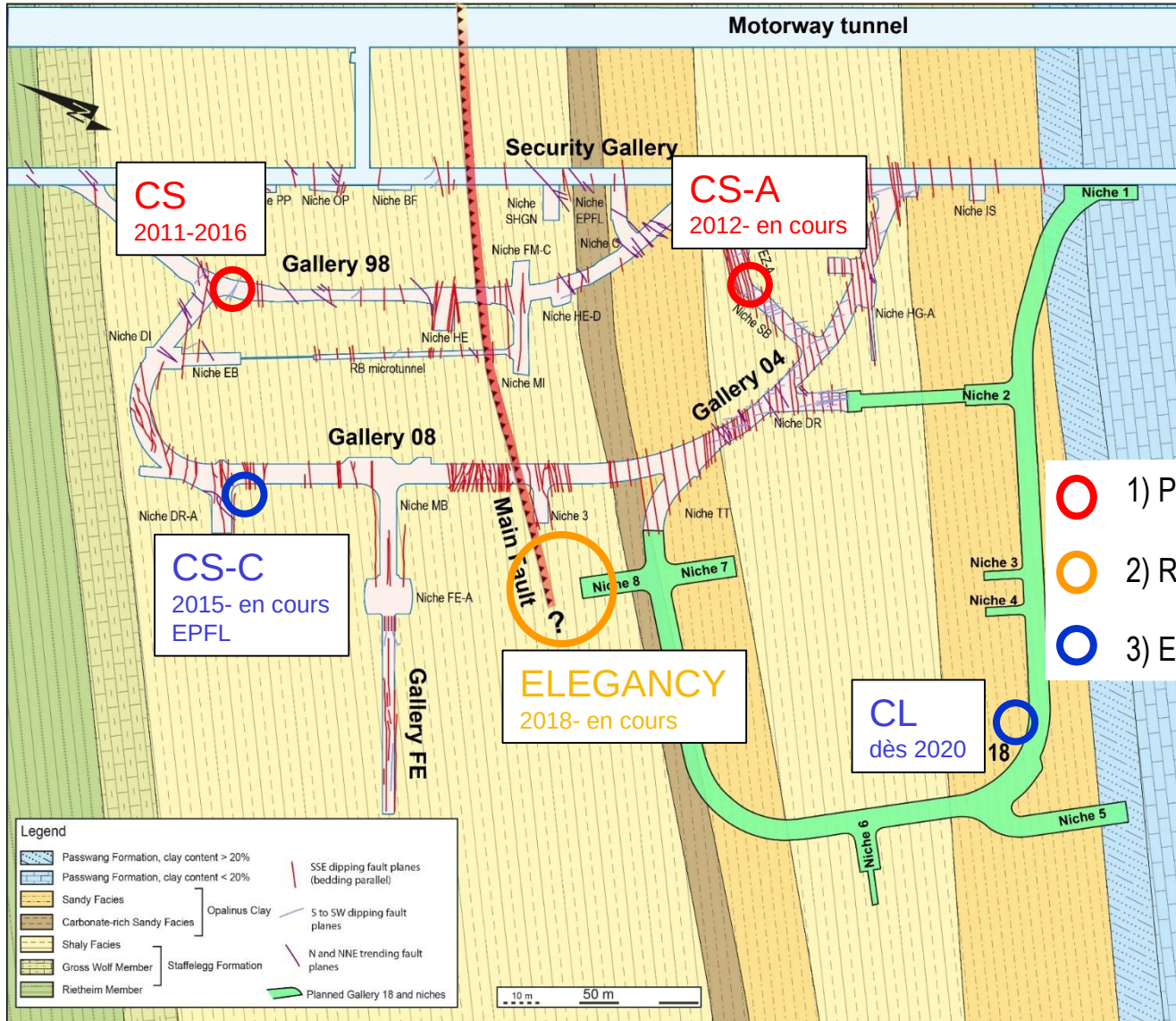
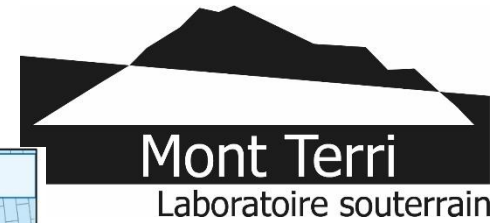
Nous étudions au Mont Terri 3 aspects fondamentaux sur la capacité des argiles à jouer leur rôle de barrière étanche:

- 1) Perte d'étanchéité des puits existants?
- 2) Risque de fuite le long des failles?
- 3) Etanchéité de la couche d'argiles?

- CS: Migration de CO₂ le long d'un forage
- CS-A: Idem et colmatage avec scellements
- CS-C: Mesures des propriétés des argiles sur échantillons
- CS-D: Injection de CO₂ dans une zone de faille
- CL: Injection de CO₂ à long terme dans l'argile intacte



Les expériences de CO₂ au Mont Terri

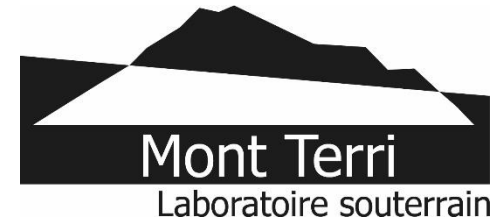


-  1) Perte d'étanchéité des puits?
-  2) Risque de fuites le long des failles?
-  3) Etanchéité de la couche d'argiles?

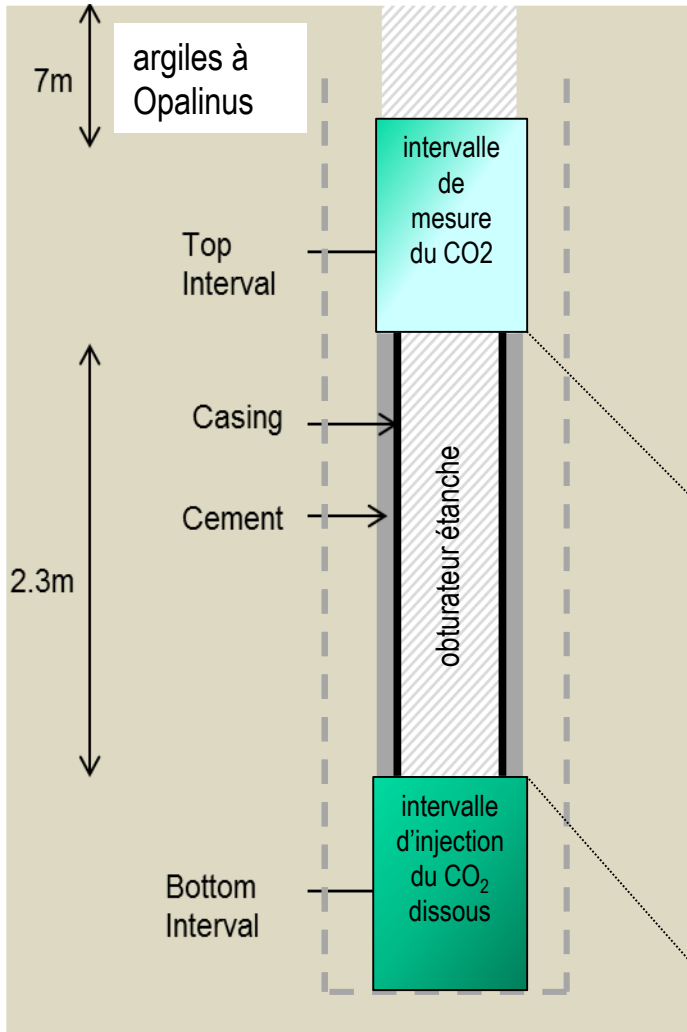


Etude du défaut d'étanchéité des puits (1/3)

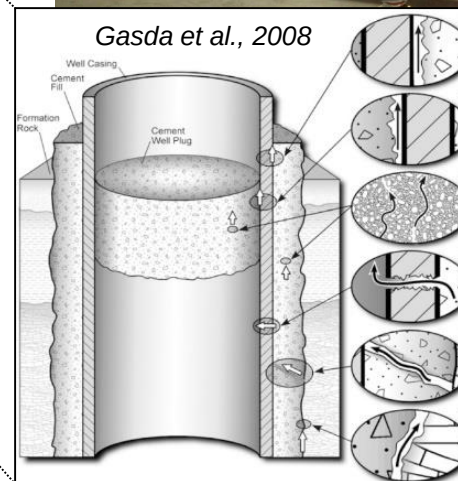
Injection de CO₂



Galerie du Mont Terri



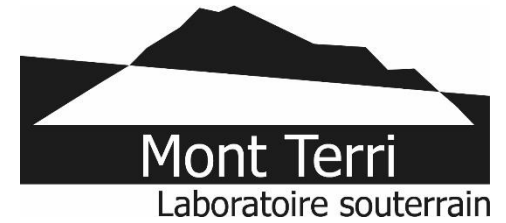
Assemblage de l'instrumentation sur site



voies de fuites potentielles le long du forage



Etude du défaut d'étanchéité des puits (2/3)

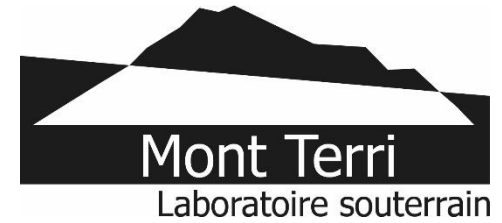


Installation de
l'instrumentation dans
le forage et
cimentation des parois





Etude du défaut d'étanchéité des puits (3/3)



Surcarottage de l'intervalle de mesure





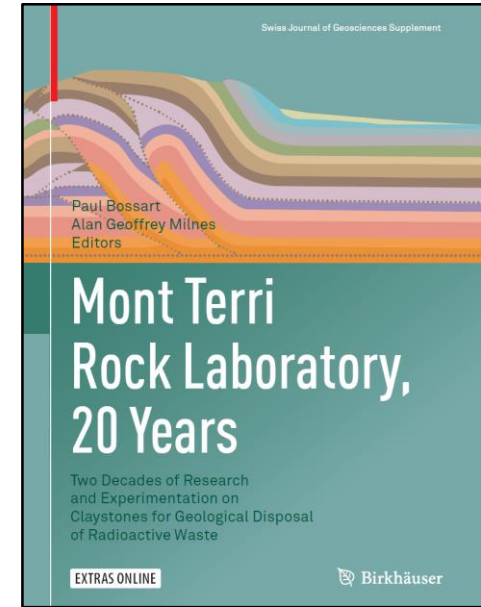
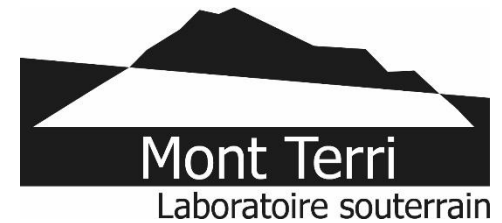
Quelles sont les premières leçons tirées des expériences CO₂ au Mont Terri avant ELEGANCY?

1. Risque de fuite le long des forages:

Evidences de précipitation de minéraux carbonatés sur les parois cimentées du forage suite à l'injection de CO₂. Les parois du forage se colmatent.

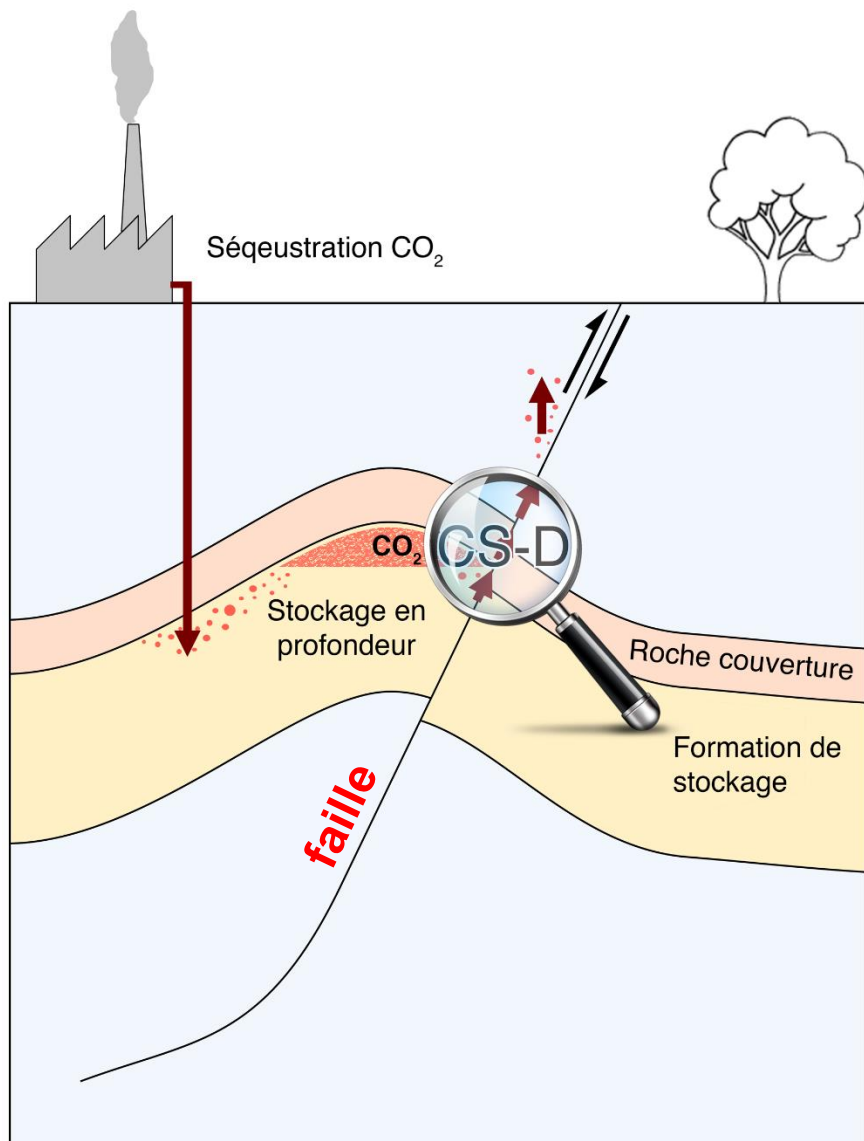
2. Risque de fuite le long des failles:

Les expériences précédentes (avec de l'eau, sans CO₂) indiquent une augmentation de la perméabilité lors de l'injection d'eau et une très faible sismicité induite (à peine mesurable, magnitude -3)





Motivations de l'expérience ELEGANCY (CS-D)



Émission et stockage de CO₂

CCS : « Capture et stockage de CO₂ »

- Séquestration de CO₂ à partir des émissions (p. ex. dans les centrales ou les cimenteries)
- Injection de CO₂ dans la roche poreuse (par exemple grès ou calcaires)
- Stockage durable sous une couche imperméable (par exemple formation argileuse)

Failles : zone potentielle de faiblesse dans la couche supérieure, à travers laquelle le CO₂ pourrait s'échapper



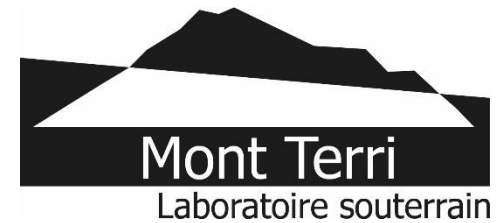
Expérience CS-D au Mont Terri :



Une étude de la perméabilité des roches de couvertures affectées par des failles



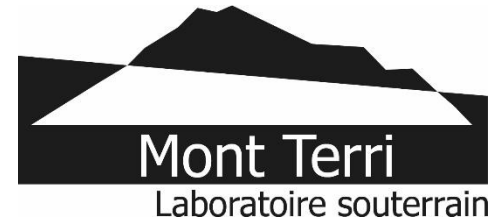
Questions auxquelles l'expérience ELEGANCY peut amener des réponses



- Comment peut-on séquestrer de manière sûre le CO_2 dans le sous-sol ?
- Comment le CO_2 est-il transporté dans la roche, quels sont les processus chimiques, hydrauliques et géomécaniques associés?
- Quelle est la qualité de nos modèles numériques et comment pouvons-nous les améliorer et les étalonner ?
- Comment réagissent en particulier les zones de faille au CO_2 ? Chemin de fuite? Micro-sismicité induite ?
- Comment réagit la couche de couverture au stockage du CO_2 ?
- Et que signifie tout cela pour le potentiel de séquestration du CO_2 en Suisse ?



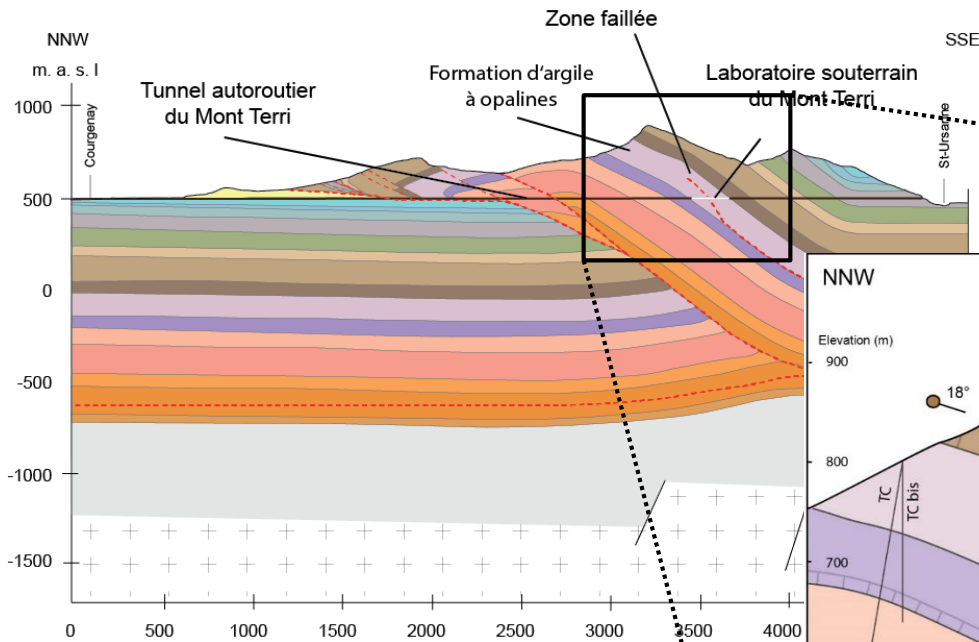
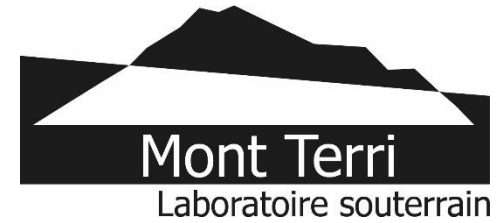
Objectifs de l'expérience ELEGANCY (CS-D)



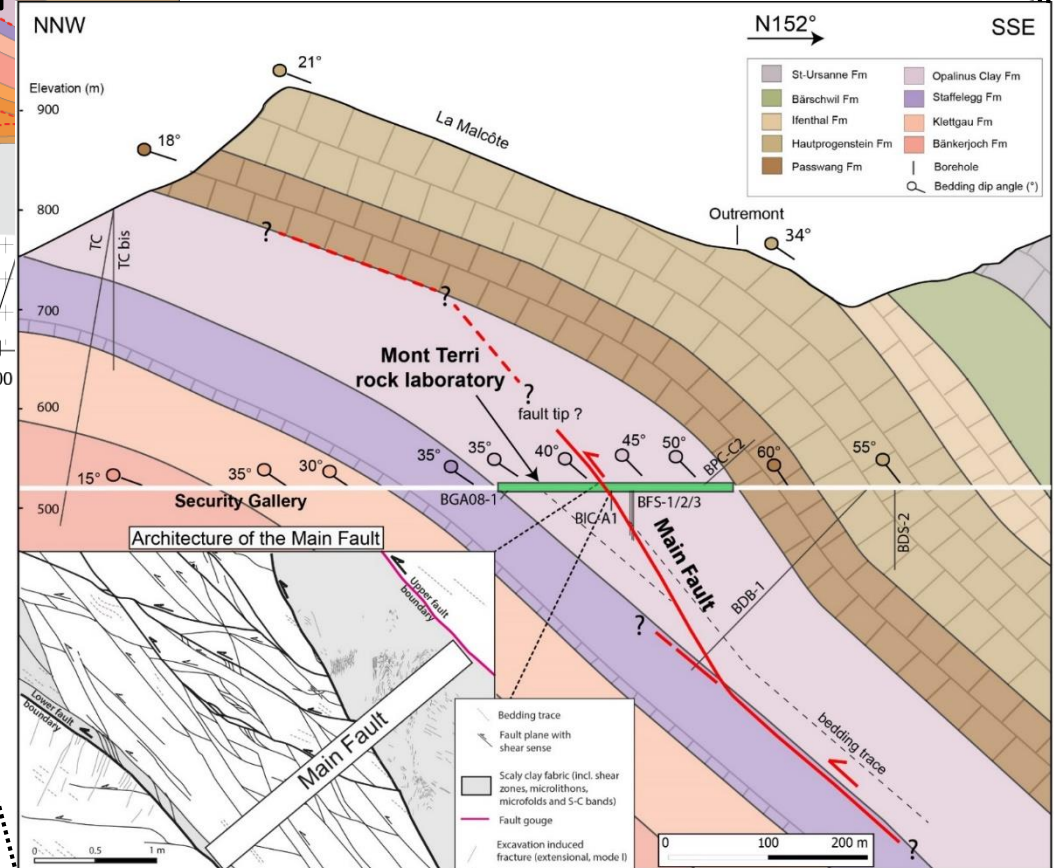
- Etudier comment le CO_2 dissous dans l'eau salée influence la perméabilité d'une couche de couverture fracturée
- Observer directement et indirectement l'expansion de l'eau salée enrichie en CO_2 , et étudier ses interactions avec la roche environnante
- Tester les instruments et les méthodes avec lesquels nous pouvons mesurer la perméabilité de la couche de couverture d'un stockage géologique de CO_2



Contexte géologique du Mont Terri



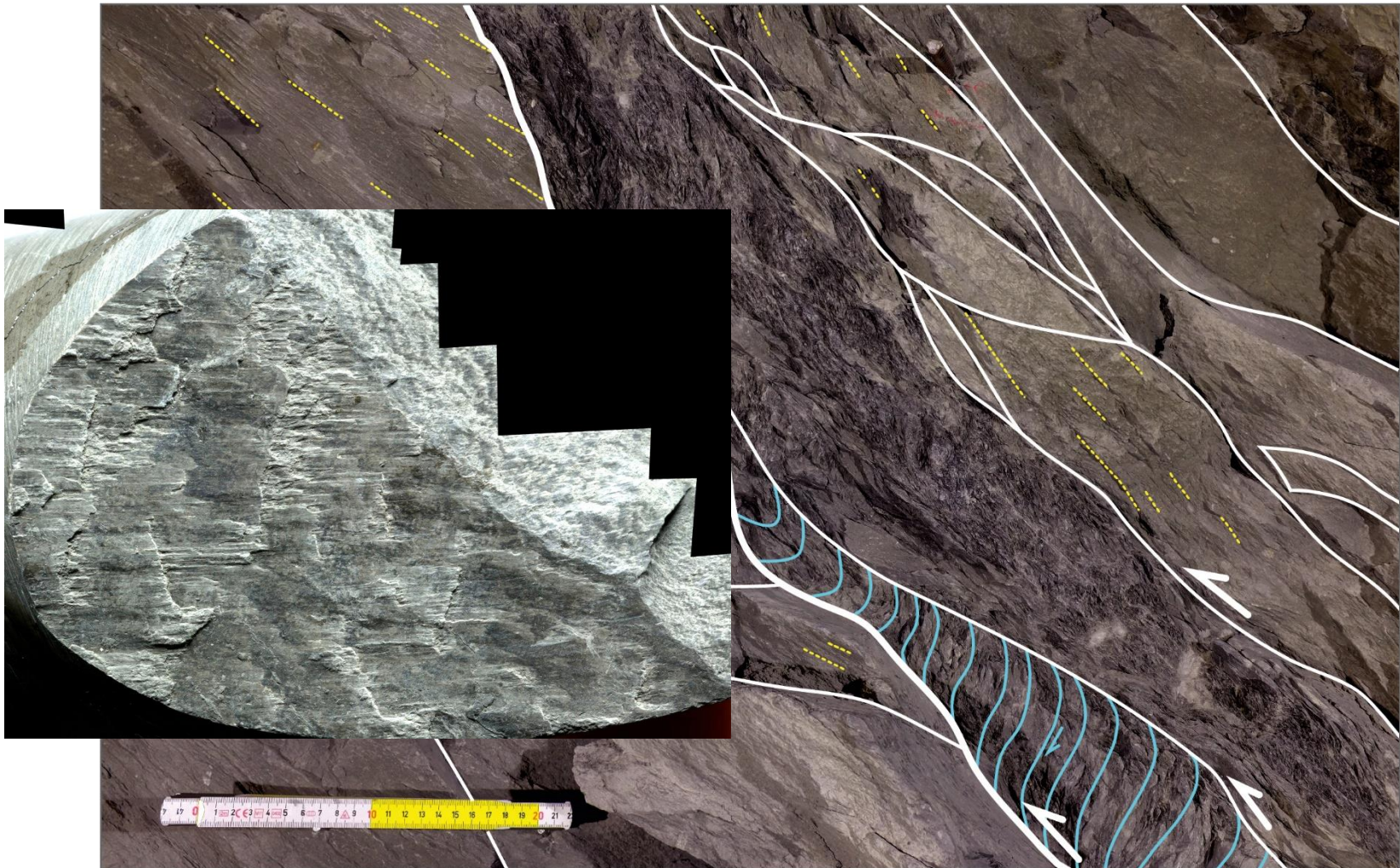
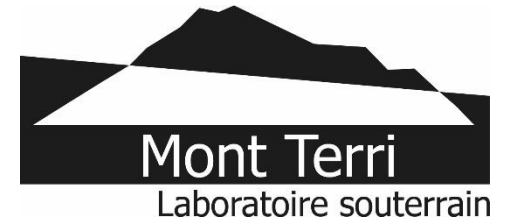
Le laboratoire souterrain, excavée dans les argiles à Opalinus, est traversée par une **zone de faille**



selon NUSSBAUM et. al., 2017: Tectonic evolution around the Mont Terri rock laboratory, northwestern Swiss Jura: constraints from kinematic forward modelling. Swiss Journal of Geosciences

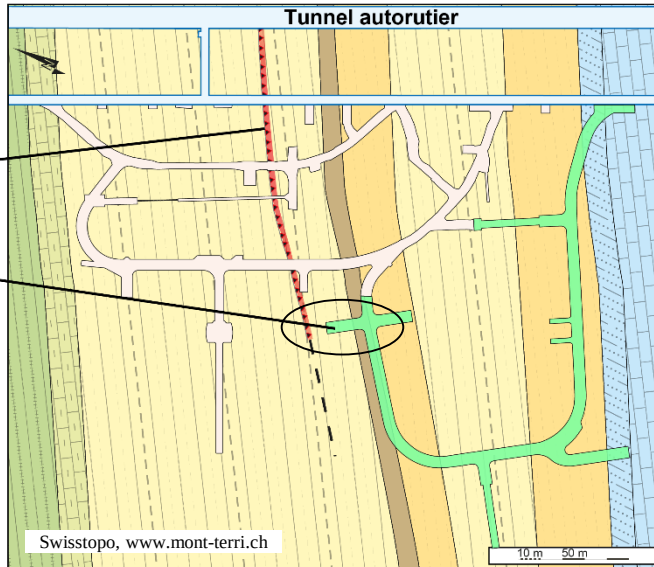


La zone de faille étudiée





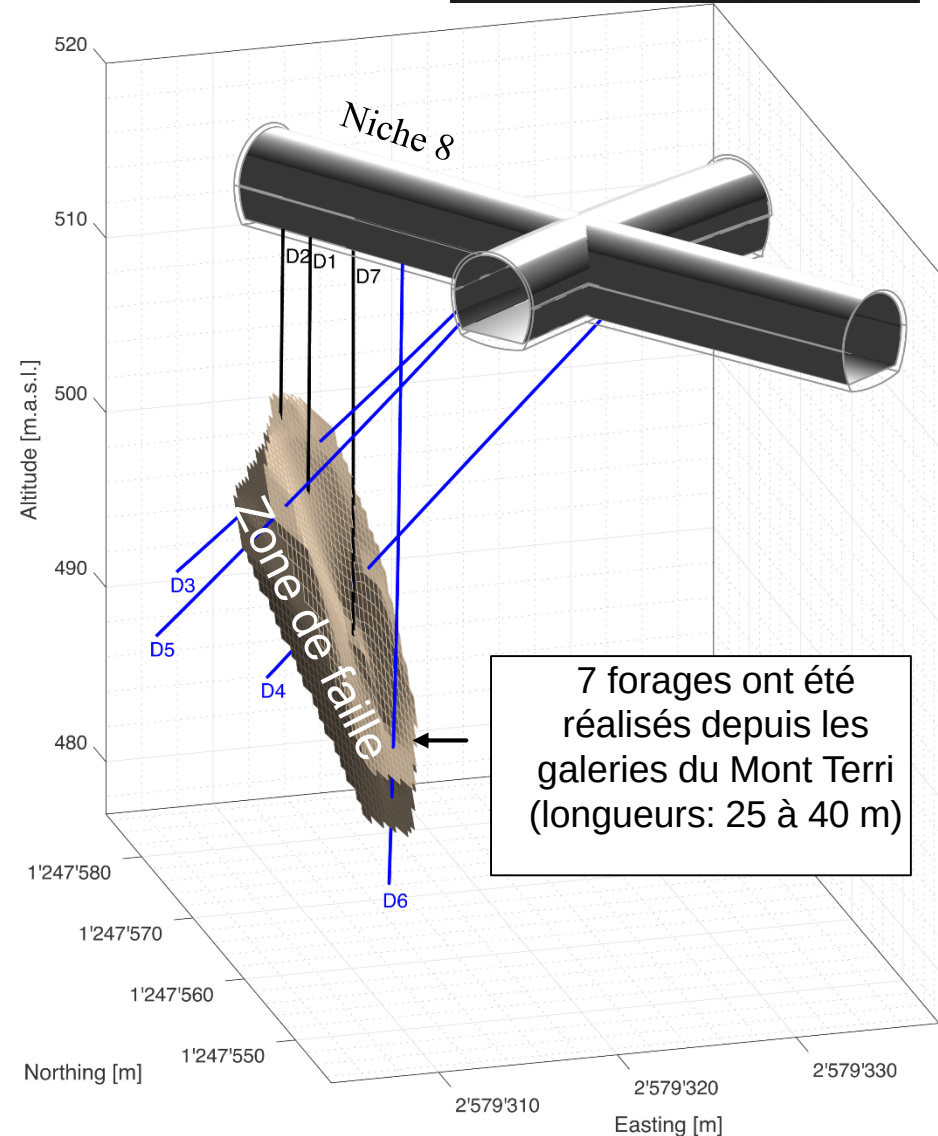
Dispositif expérimental



Zone faillée à
pendage vers
le sud-est

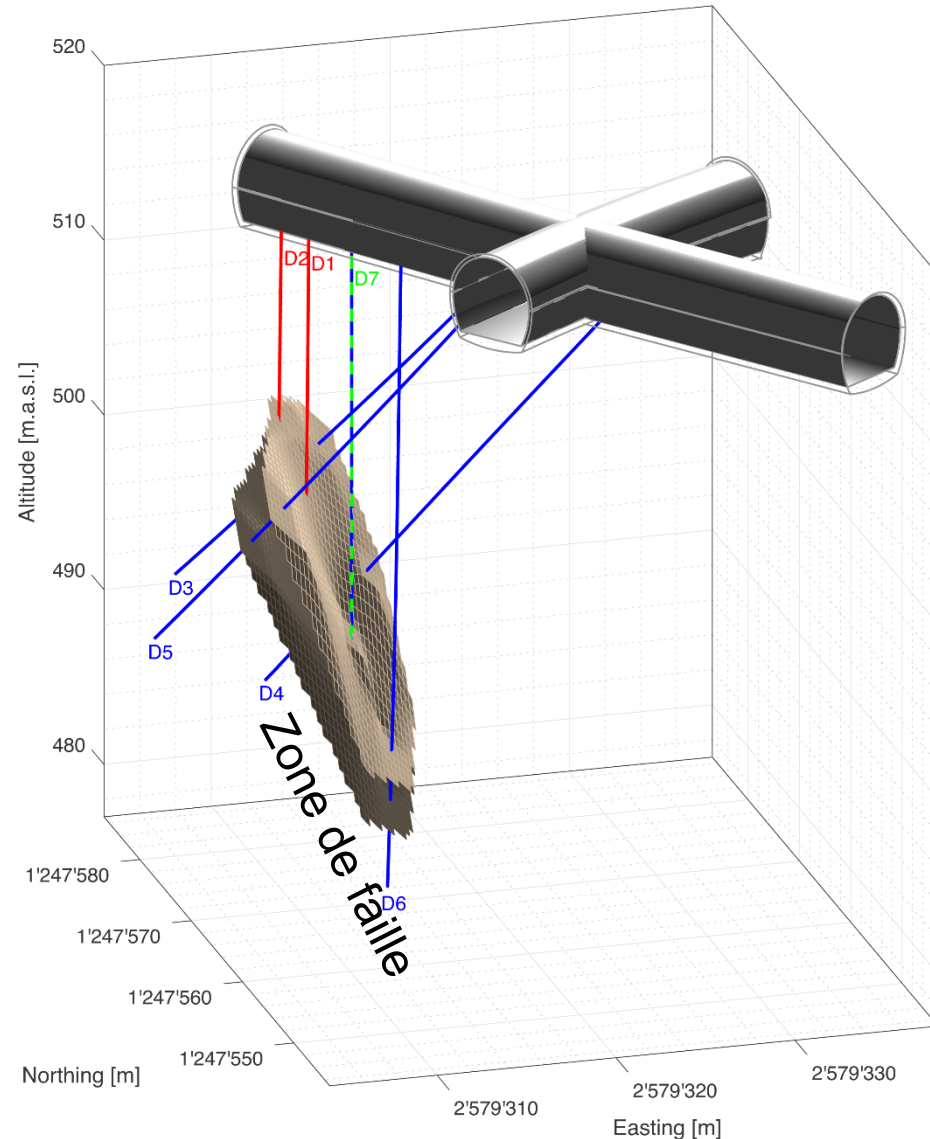
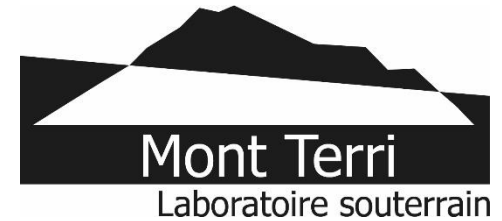
Niche 8 dédié à
l'expérimentation
CS-D

Formations d'argile à opalines





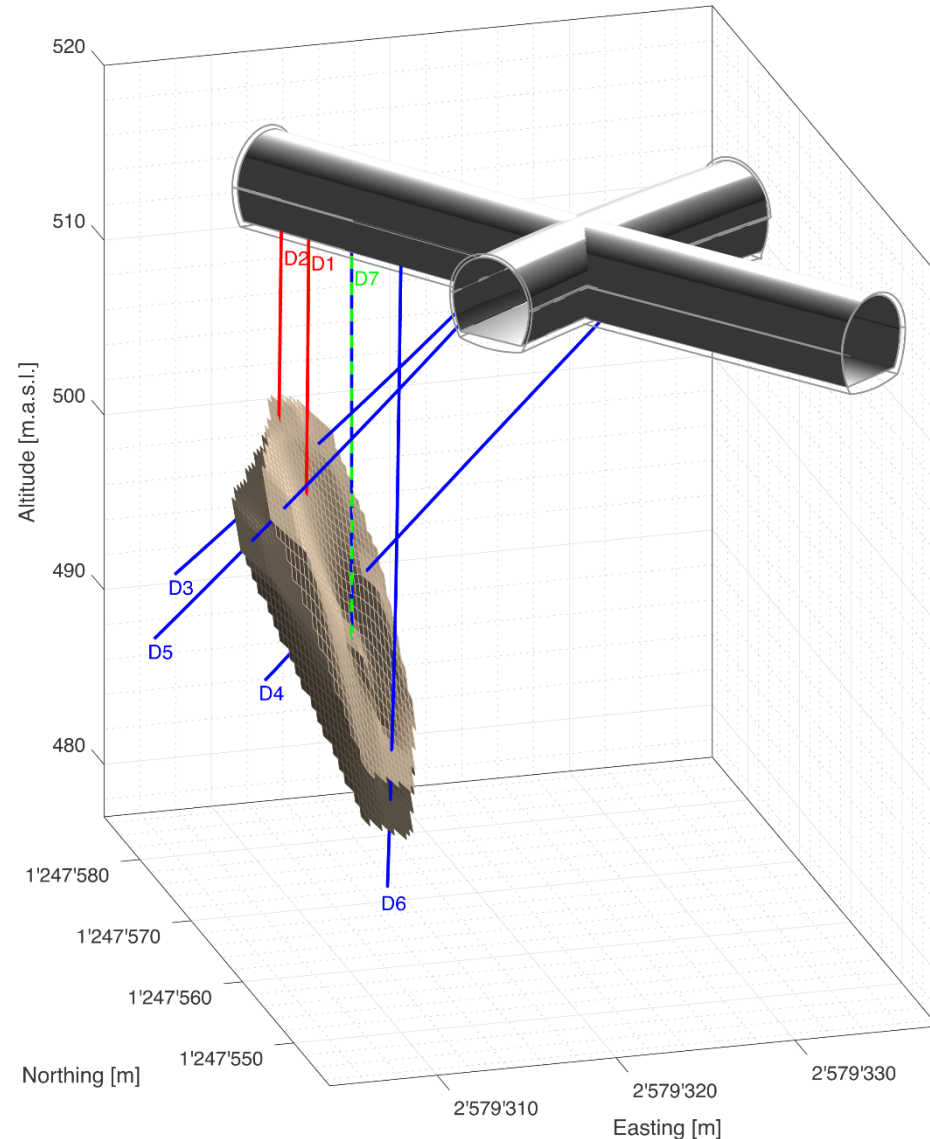
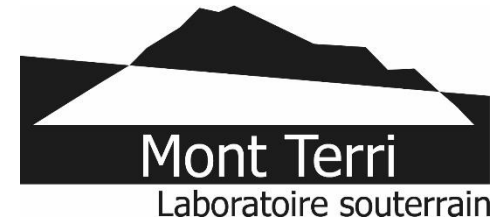
Injection de CO₂ et observations directes



- Injection de CO₂, dissous dans l'eau salée, dans le forage D1 et enregistrement continu du volume stocké et de la pression.
- Prélèvement de fluide dans le forage D2 pour la détermination de l'arrivée potentielle du CO₂.
- Prélèvement d'échantillons de roche après l'expérimentation dans un nouveau forage pour des études géophysiques et géochimiques.



Surveillance avec des méthodes géophysiques et géotechniques



- Tomographies sismiques pour déterminer les propriétés mécaniques de la roche et géoélectriques pour mesurer la conductivité électrique
- Surveillance de la microsismicité (magnitude inférieure à -4)
- Mesures de la déformation

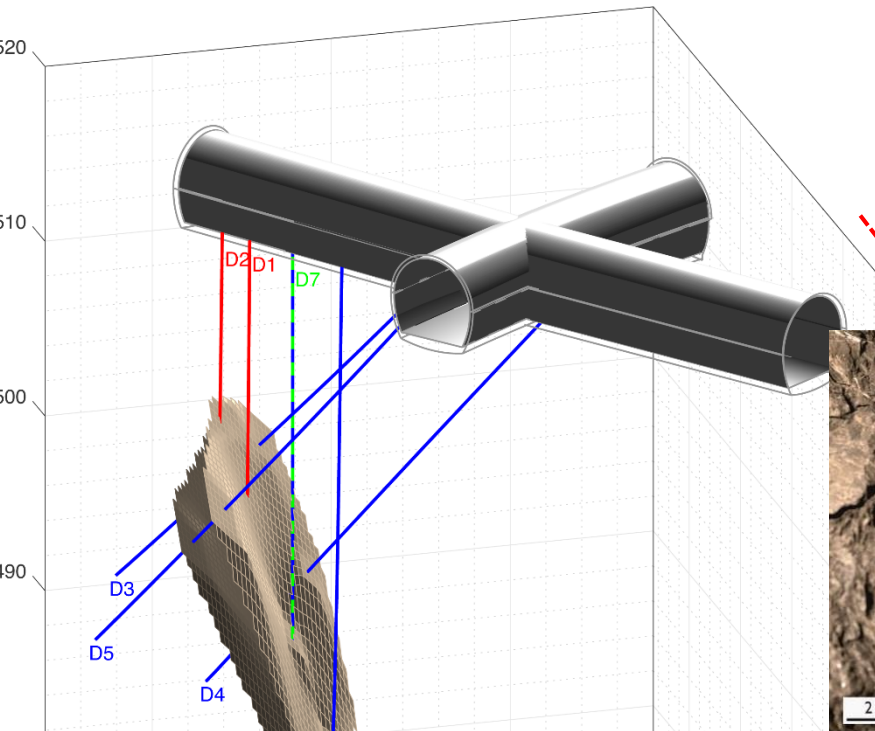
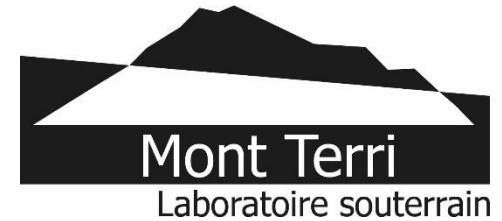
Tomographie : Représentation de la structure interne d'un corps, exemple de la médecine



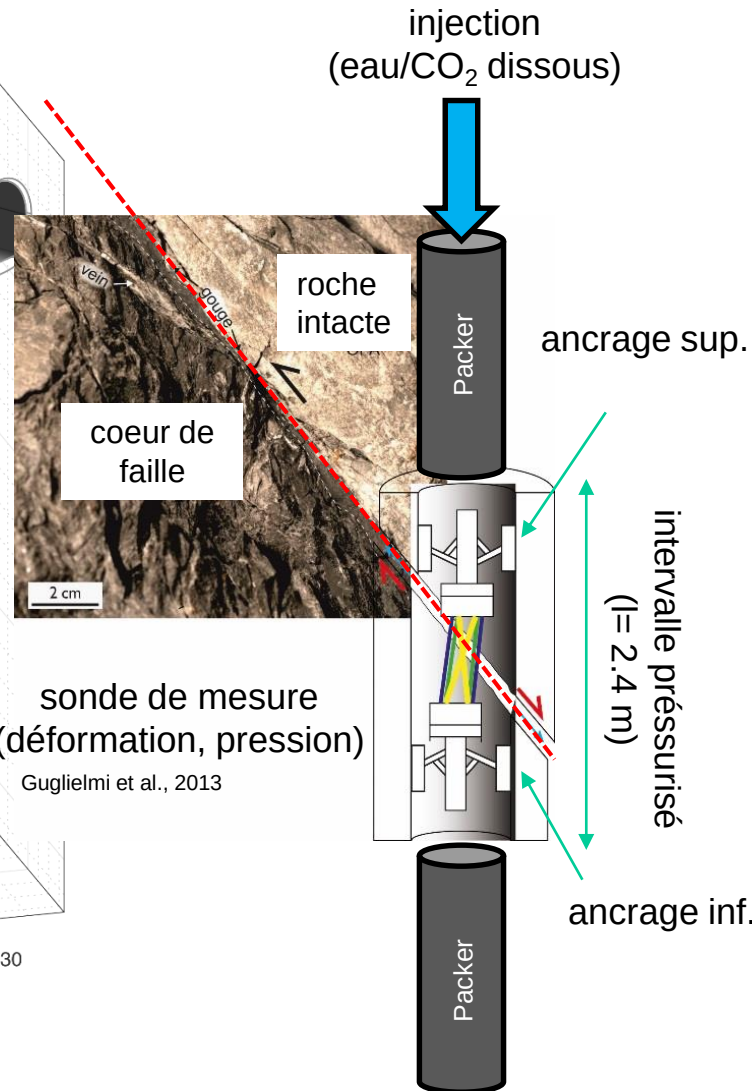
Source: Wikipedia, download, 9. Jan. 2018.
Image 1 by Pfrump16 - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64157788>
Image 2 by Cfrglazer at English Wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2217434>



Activation de la zone de faille

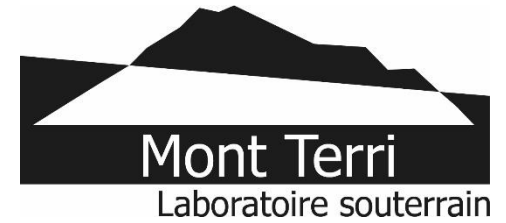


- Injection d'eau sous pression dans le forage D7 jusqu'à ce que la faille soit légèrement réactivée (sismicité induite avec des magnitudes d'ordre de grandeur -2 à -3)
- Ensuite nouvelle injection de CO_2 dans le forage D1





Quelques impressions



Forages



Instrumentation

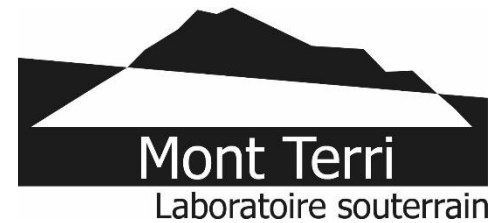


Documentation des
carottes de forage





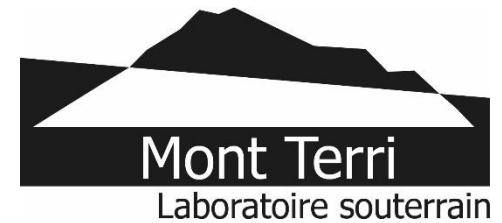
Calendrier de l'expérience



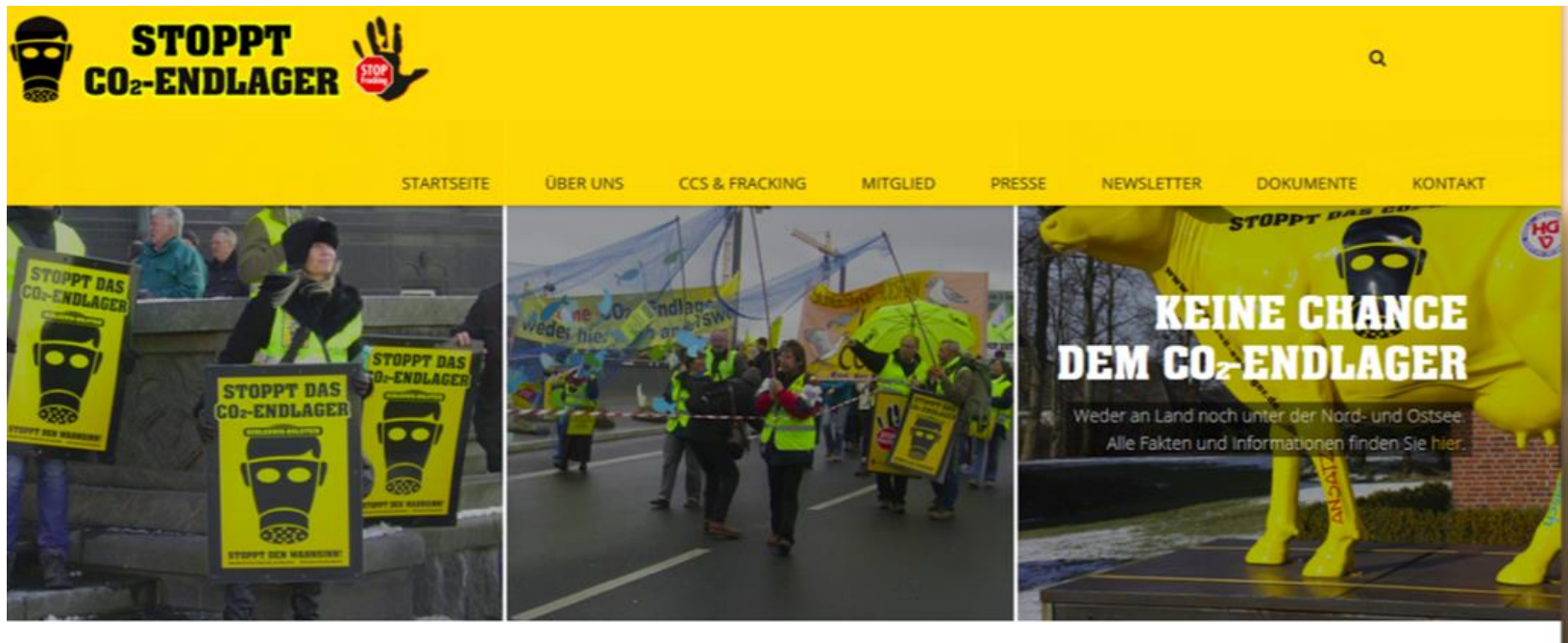
- Début de l'injection de CO₂: fin mars 2019
- Fin de l'expérience ELEGANCY: automne 2020
- Suite de l'expérience au-delà de 2020 dans le cadre du programme annuel de recherche du Mont Terri



Quel avenir pour le stockage du CO₂ en Suisse ?

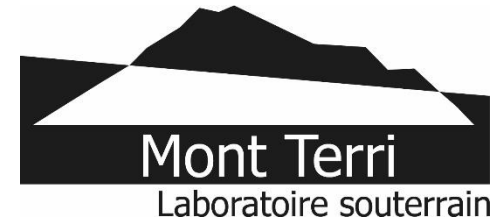


- Pas seulement un défi technologique et scientifique, mais aussi (et surtout) un enjeu sociétal et d'acceptation par notre société





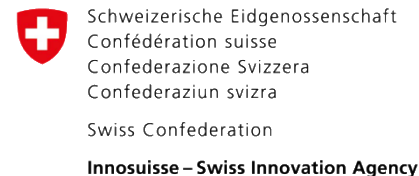
Remerciements



ACT ELEGANCY, projet n° 271498, a reçu des financements du DETEC (CH), de BMWi (DE), RVO (NL), Gassnova (NO), BEIS (UK), Gassco, Equinor et Total, ainsi que de la Commission européenne dans le cadre du programme Horizon 2020, convention de subvention ACT n° 691712.



Ce projet est soutenu par le programme pilote de démonstration de l'Office Fédéral de l'Énergie suisse (Ofen). Il est mené au sein du Swiss Competence Center for Energy Research - Supply of Electricity (SCCER-SoE / Innosuisse)



L'expérience CS-D est également cofinancée par les partenaires du Consortium Mont Terri





Merci pour votre patience et votre attention!



Le laboratoire du Mont Terri se visite. Contact: www.mont-terri.ch