

U3a 2018/2019



DIVERSITÉ ET DÉFIS DE LA GÉOTHERMIE

Benoît Valley - Groupe de Géothermie et Géomécanique
Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie - CHYN
Université de Neuchâtel



Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie - CHYN

2018-19

LA GÉOTHERMIE : DÉFINITION

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter.

[wikipedia]



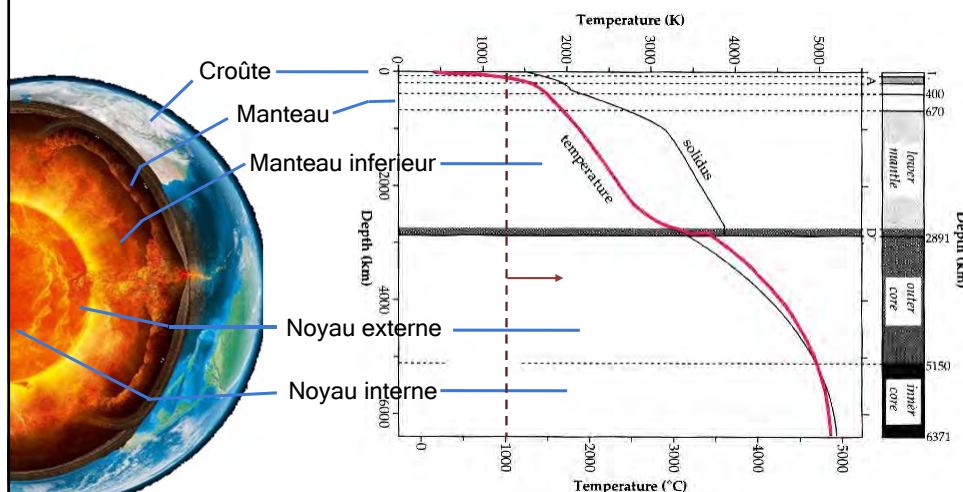
U3a géothermie 2018/19

2

MENU DU JOUR...

- Structure thermique de la terre chaud dessous !
- Potentiel énergétique de la géothermie.
- Exploitation de ce potentiel : une grande diversité !
- Défis de la géothermie profonde : la perméabilité !
- Recherche: expériences pour mieux comprendre les mécanismes de création de perméabilité.
- Perspectives : 1) diversité des approches & 2) mieux connaître et gérer notre sous-sol.

STRUCTURE DE LA TERRE



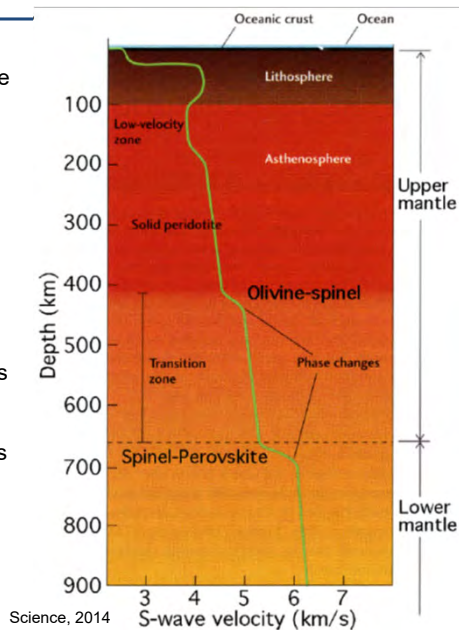
99 % de la masse du globe est à >1000° C et seul 0.1 % (en moyenne les premier 3 km) est à moins de 100° C.

STRUCTURE THERMIQUE

Le profil de température à l'intérieur du globe n'est pas connu précisément.

Les **mesures directes** sont possibles seulement dans la partie supérieure de la croûte (mine ~4000 m; forage le plus profond 12.2 km en Russie, 1989)

La structure de température de la terre est connue principalement grâce à des **mesures indirectes**. La sismologie met en évidence des zones où la vitesse des ondes sismiques (ondes P et S) change subitement. Ces zones sont dues à des **changements de phase** de minéraux. Des expériences en laboratoire à haute pression et température indiquent quels sont les conditions prévalantes lors de ces changements de phase et permettent de déterminer la température à certaines profondeurs (points d'ancrage).

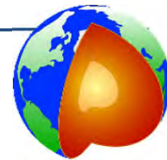


U3a géothermie 2018/19

5

LA CHALEUR DE LA TERRE

99 % de la masse du globe est à >1000° C et seul 0.1 % est à moins de 100° C.



✦ La chaleur de la terre provient:

- La chaleur générée durant la **formation de la terre** (effondrement gravitaire).
- La chaleur générée par la **radioactivité naturelle** (principalement U, K, Th).

D'autres sources de chaleur, comme la chaleur générée par la friction pendant les tremblements de terre, **sont négligeables**. Initialement, de la chaleur a été aussi libérée lors de la formation d'un **noyau solide (chaleur latente)**. Puisque le noyau solide est encore en croissance, ce processus contribue encore au flux de chaleur de la terre aujourd'hui.

La terre **perd sa chaleur** à un taux de 4.4×10^{13} W (44 TW), principalement sous la forme d'infrarouge émis dans l'espace.

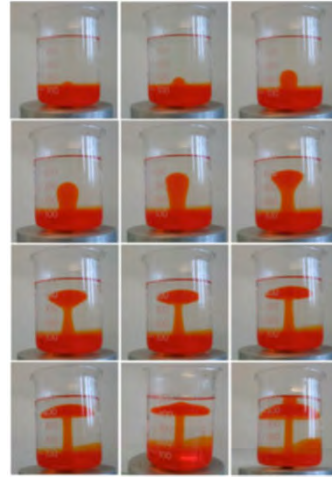
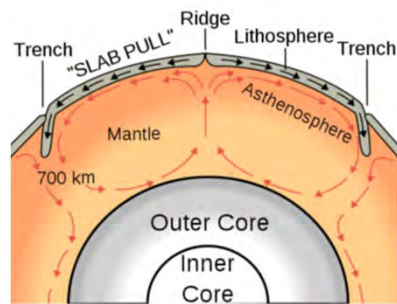
Ceci reste néanmoins faible par rapport à l'énergie solaire absorbée et réémise qui est égale à $\sim 10^{17}$. C'est pourquoi c'est l'énergie solaire qui domine le temps qu'il fait, le climat et l'érosion des montagnes. C'est par contre l'énergie géothermique qui est le moteur de la tectonique des plaques et de la formation des chaînes de montagnes.

U3a géothermie 2018/19

6

STRUCTURE THERMIQUE ET CONVECTION

En plus de la structure thermique radiale, des variations de température latérales reflètent la convection dans le manteau. Il n'est pas sûr si une seule boucle de convection couvre l'entière épaisseur du manteau ou si il y a plusieurs couches. Par contre il est clair que la convection dans le manteau influence le volcanisme en surface et la distribution du flux de chaleur dans la lithosphère.



U3a géothermie 2018/19

7

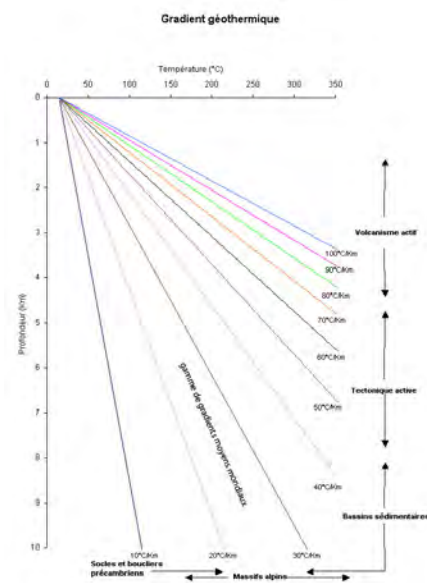
LE GRADIENT GÉOTHERMIQUE

« Proche de la surface » et pour comparer des zones entre elles et quantifier l'anomalie thermique, on utilise le gradient géothermique.

Définition : Le gradient géothermique (GT) correspond au nombre de degrés gagnés par unité de profondeur.

Les grandes variations régionales et locales du GT dépendent de **3 facteurs** :

- Conditions tectoniques et géologiques, type des roches et présence ou absence d'eau (mobile ou non).

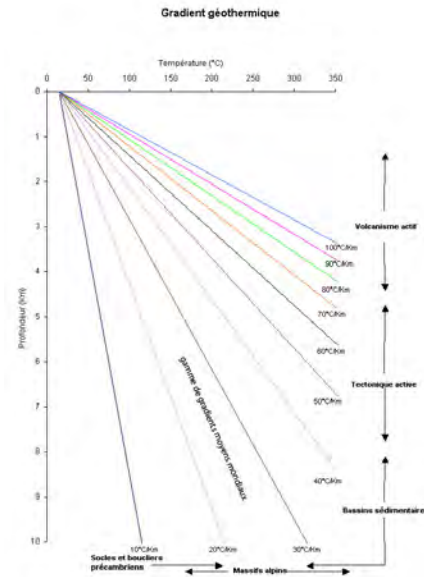


U3a géothermie 2018/19

8

LE GRADIENT GÉOTHERMIQUE

- La moyenne mondiale du GT se situe entre 25 et 30 °C/km.
- Les zones de vieux socles cristallins (Canada, Scandinavie) ont un GT compris entre 10 et 20 °C/km.
- Les zones tectoniquement actives ont un GT compris entre 40 et 50 °C/km.
- Les zones d'activité volcanique ou hydrothermales actives ont un GT se situant entre 60 et 100 °C/km.



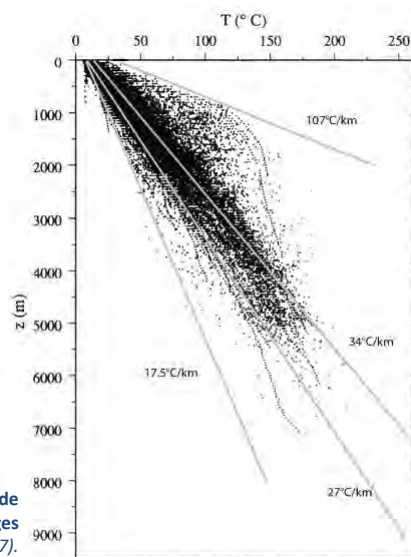
U3a géothermie 2018/19

9

LE GRADIENT GÉOTHERMIQUE

- On constate la présence de GT très différents, compris entre 17 et 107 °C/km.
- La grande majorité se trouve entre 25 et 40 °C/km.
- Certains gradients augmentent avec la profondeur, d'autres diminuent.
- Les valeurs très élevées proviennent de la région du graben du Rhin et du volcanisme du Kaiserstuhl, du Hegau et de la région de Bad Urach.
- Les valeurs extrêmes au niveau du globe varient de ± 0 à >100 °C/km.

Profils température - profondeur pour une série de 38'882 points de mesure provenant de 9067 forages en Allemagne (d'après Clauser 1997).

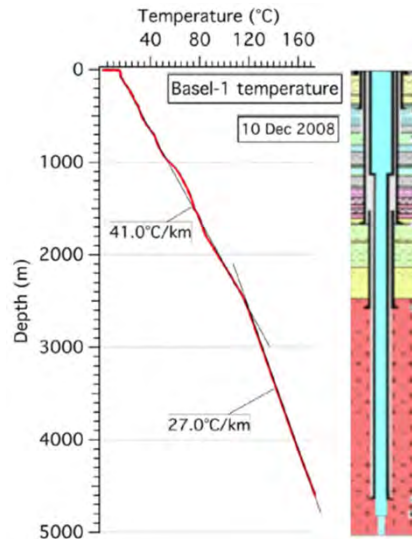


U3a géothermie 2018/19

10

LE GRADIENT GÉOTHERMIQUE

- En Suisse, il est en général dans la gamme des gradients moyens, avec quelques exceptions, notamment à Bâle, en raison de la proximité du fossé rhénan (graben): 35-40 °C/km.
- Dans le Bassin parisien, où se trouvent plus de 35 opérations de géothermie, le gradient est tout à fait normal.
- Dans une zone de sources thermales, le GT se situe entre 100 et 1000 °C/km, car il y a transport convectif de la chaleur vers la surface.

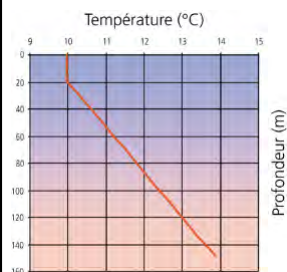


U3a géothermie 2018/19

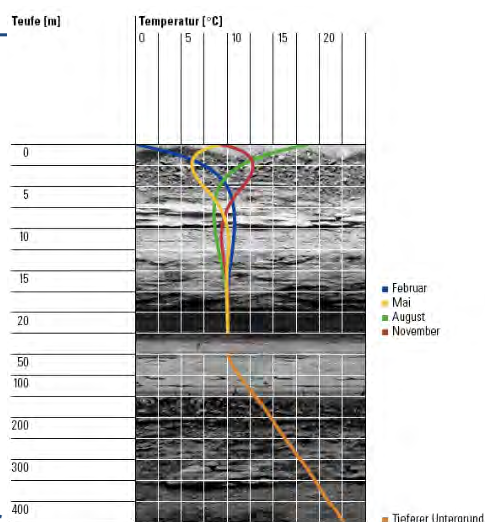
11

LE GRADIENT GÉOTHERMIQUE

- A proximité de la surface, les températures sont très variables: fluctuations journalières de 0.3 à 0.7 m.
- En dessous, on mesure encore des variations: fluctuations saisonnières de 1 à 15 ou 20 m de profondeur selon le type de roches et la présence d'eau.



Valeurs habituelles de la température à faible profondeur sur le Plateau suisse



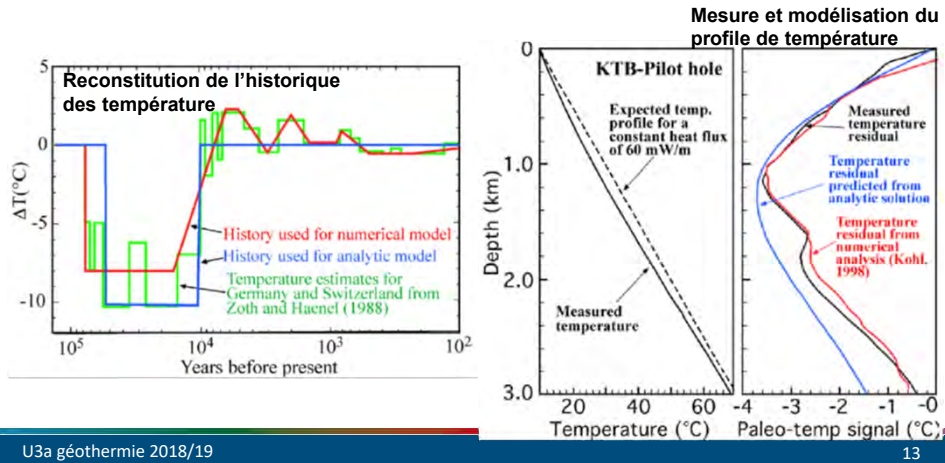
Variations saisonnières de la température de 0 à 20 m

U3a géothermie 2018/19

12

LE GRADIENT GÉOTHERMIQUE

En plus des cycles journaliers et saisonniers, des influences de variation de la température à plus long terme peuvent être présente. Particulièrement, les périodes froides liées aux dernières glaciations on été identifiées sur des mesures du gradient géothermique dans le forage profond KTB en Bavière. Les observations peuvent être modélisées en considérant un historique des températures pour les 150'000 dernière années



LE FLUX DE CHALEUR

La chaleur « s'écoule » du chaud vers le froid

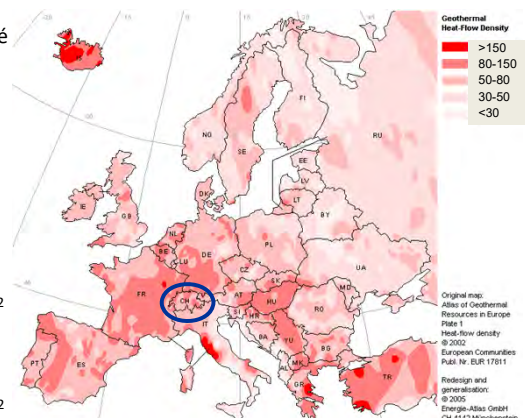
Définition du Flux de chaleur

La densité de flux de chaleur est la quantité de chaleur s'écoulant à travers une surface unitaire par unité de temps.

Flux de chaleur en surface

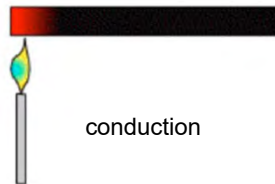
- Pour l'ensemble de la terre: 44 TW
- En moyenne environ 87 mW/m²
(rayon de la terre: 6300 km)
surface de la terre 5x10¹⁴ m²)
- Croute continentale: 65 mW/m²
- Basins océanique: 101 mW/m²
- Zone volcanique active
localement: 1000 - 3000 mW/m²

Carte du flux de chaleur en Europe (mW/m²)



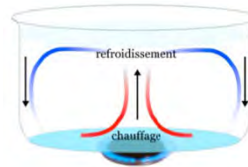
FLUX GÉOTHERMIQUE – PROVINCES CONTINENTALES

Province géologique	Tectonique	Transfert de chaleur	Flux régional (mW/m ²)	Gradient régional (° C/km)
Bouclier canadien précambrien, Est des USA	stable, zone continentale	conductif	40-60	20-30
Basin & Range (Nevada)	active, extensive	important, convectif	80-120	40-50
Sierra Nevada (Californie)	subduction ancienne	transitoire, conductif	40	20-30
Rio Grande Rift (Nouveau Mexique)	fossé, croûte amincie	important, convectif	80-120	40-50



conduction

Convection (ou advection)



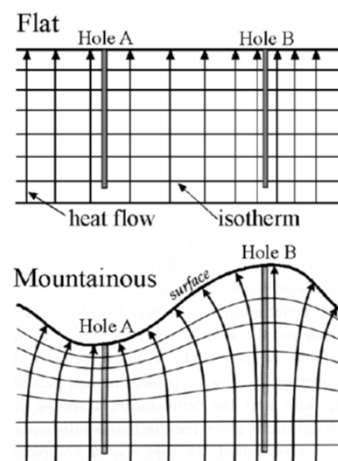
EFFET DE LA TOPOGRAPHIE SUR LE FLUX DE CHALEUR

La **topographie** influence le flux de chaleur.

Les lignes flux ont tendance à être incurvées vers la plus courte distance vers la surface, c.-à-d. vers le fond des vallées.

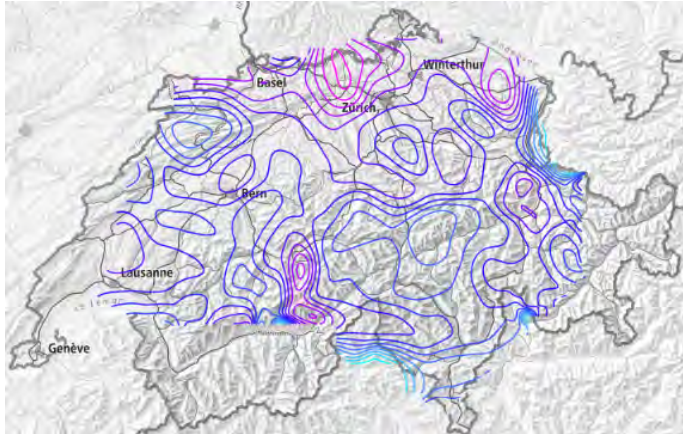
En conséquence le gradient géothermique est plus fort en fond de vallée (les isothermes sont plus serrées).

À une profondeur plus profonde (par rapport à l'amplitude et la longueur d'onde du relief), l'effet de la topographie s'estompe.



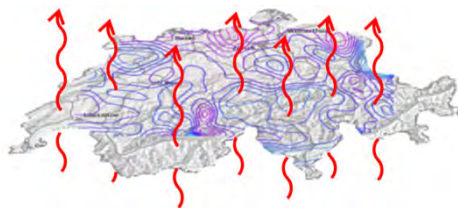
FLUX DE CHALEUR EN SURFACE EN SUISSE

Carte du flux de chaleur estimé pour le nord de la Suisse basé sur des mesure de profile des température en forage.
 Le flux de chaleur est généralement légèrement plus élevé que la moyenne pour la croute continentale (65 mW/m²).
 Les «points chauds» reflète des location ou la le flux est influencé par l'advection.



Flux de chaleur en surface (swisstopo)

QUANTITÉ D'ENERGIE ANNUELLE FOURNIE PAR LE FLUX GÉOTHERMIQUE



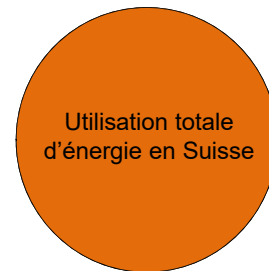
41'285 km²

x

70 mW/m²

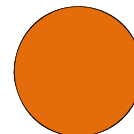


25 milliards de kWh /an



300 milliards de kWh /an

Utilisation d'énergie en Suisse pour le chauffage



72 milliards de kWh /an

QUELLE QUANTITÉ DE CHALEUR EST STOCKÉE DANS LA CROÛTE ?

Quantité d'énergie [J]

$$Q = m c \Delta T$$


Refroidissement [°C]
 Capacité thermique massique [J kg⁻¹ °C⁻¹]
 Masse [kg]

160 °C → 140 °C $\Delta T = 20$ °C

1 km³ de granite $m = 3$ Giga tonnes

Capacité massique du granite $c = 790$ J kg⁻¹ °C⁻¹

$Q = 50'000$ TJ = 14 milliard de kWh

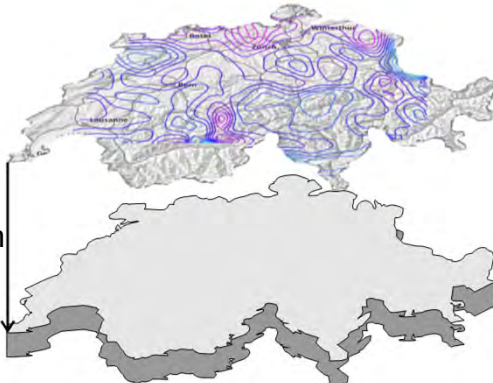


U3a géothermie 2018/19

19

QUELLE QUANTITÉ DE CHALEUR EST STOCKÉE SOUS LA SUISSE ?

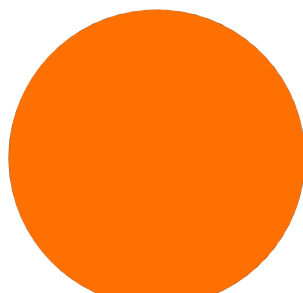
41'285 km²
 x
 14 milliards de kWh
 ↓
580'000 milliards de kWh



5 km
 1 km

- **300 milliards de kWh /an**
 Utilisation totale d'énergie en Suisse

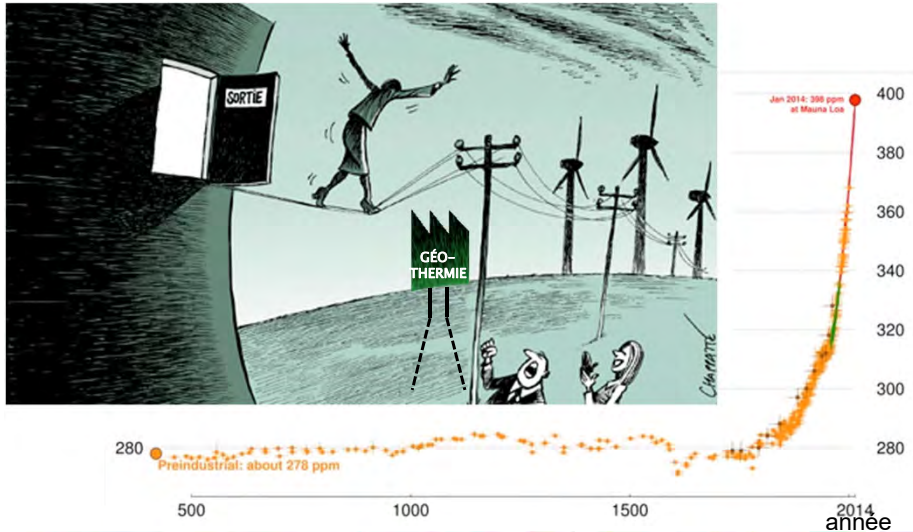
→ 2000 ans d'approvisionnement énergétique



U3a géothermie 2018/19

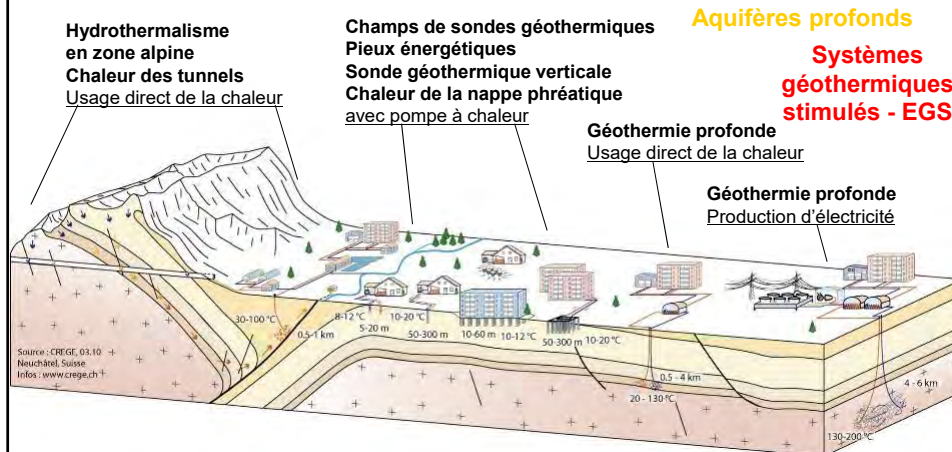
20

COMMENT EXPLOITER L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE POUR CONTRIBUTER À UNE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN RÉPONSE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ?



IL Y A PLUSIEURS SORTES DE GÉOTHERMIES ...

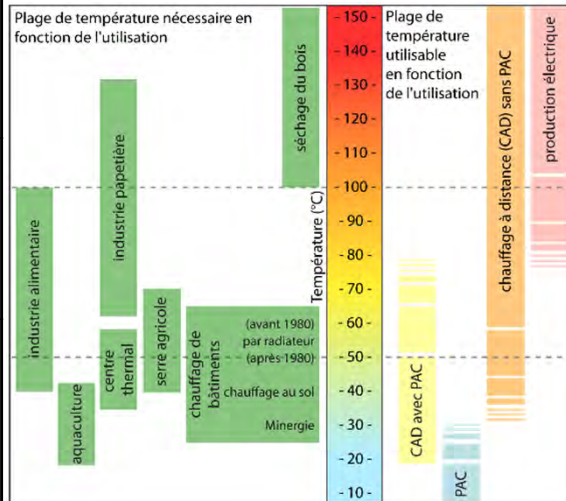
Géothermie basse température et faible profondeur



- Les types de mise en valeur de la géothermie sont très divers
- Les problématiques associées sont très différentes

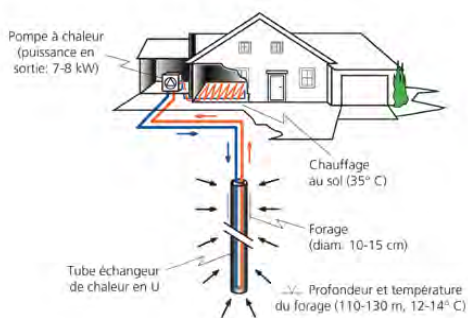
UTILISATION DE LA CHALEUR

<p>Utilisations industrielles: pâte à papier, ciments, évaporation, réfrigération, séchage, distillation, alimentation, chauffage.</p>	<p>100 - > 150 ° C</p>
<p>Chauffage direct avec l'eau: habitations, serres, locaux divers, dégivrage de routes et d'édifices.</p>	<p>50 -> 100 ° C</p>
<p>Chauffage direct avec l'eau: balnéologie, thermalisme, pisciculture</p> <p>Chauffage indirect avec pompe à chaleur: habitations, locaux divers.</p>	<p>10 -> 50 ° C</p>

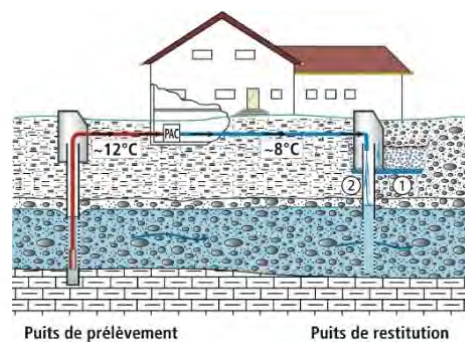


CHAUFFAGE AVEC POMPE À CHALEUR

Sonde géothermique verticale pour une villa familiale



Pompe à chaleur sur nappe



SYSTÈME ÉNERGÉTIQUES AVEC ÉCHANGEURS DANS LE SOUS-SOL



Stock souterrain de chaleur à Pesex (NE)

Chauffage du Collège des Coteaux depuis 1996.

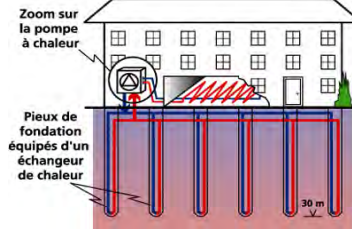
Volume du stock : 29'000 m³ avec 30 sondes de 60 m en double U.

Terrain foré : calcaire et marno-calcaire.

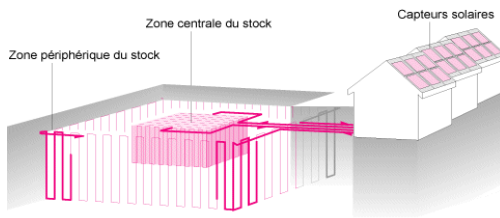
Collecteurs solaires : 306 m²



Centre scolaire de Fully (VS)



Cage d'armature pour un pieu énergétique moulé



U3a géothermie 2018/19

EXEMPLES D'UTILISATION DIRECTE DE LA CHALEUR (1)



Dégivrage d'un trottoir



Thermalisme



Pisciculture



Maisons familiales



Serres agricoles

U3a géothermie 2018/19

26

EXEMPLES D'UTILISATION DIRECTE DE LA CHALEUR (2)



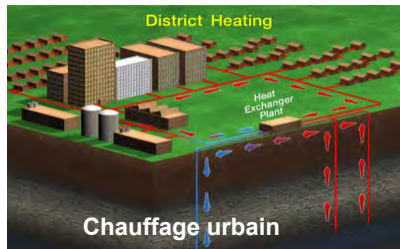
Reykjavik aujourd' hui



Centrale de chauffage à Riehen



Reykjavik en 1920



Chauffage urbain

EXEMPLES D'UTILISATION DIRECTE DE LA CHALEUR (3)

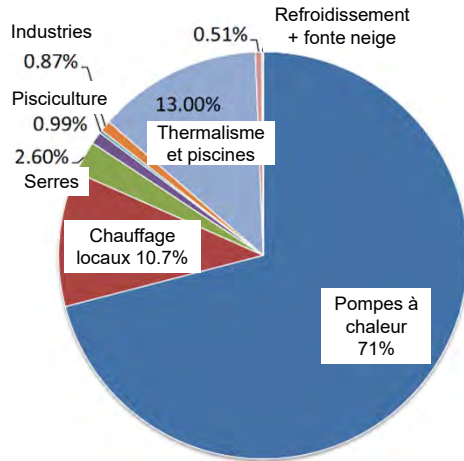
Schéma d'un CAD géothermique en région parisienne



Deux exemples de centrales géothermiques pour du chauffage urbain en Hongrie



USAGES DE LA CHALEUR GÉOTHERMIQUE DANS LE MONDE



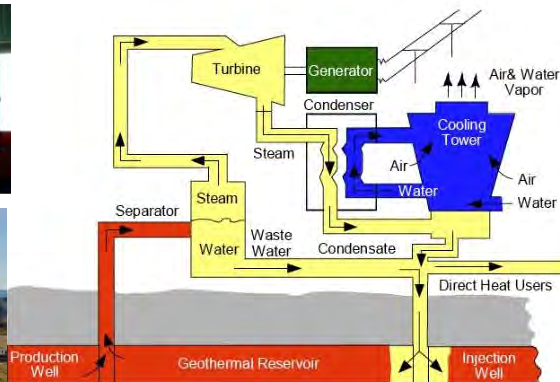
Production de chaleur géothermique et puissance installée dans les premiers pays (Lund & Boyd, 2015)

Rang	Pays	Puissance installée (MWth)	Production (GWh/an)
1 ^{er}	Chine	17'870	48'430
2 ^e	USA	17'420	21'070
3 ^e	Suède	5'600	14'420
4 ^e	Turquie	2'890	12'540
5 ^e	Allemagne	2'850	5'430
6 ^e	France	2'350	4'410
9 ^e !	Suisse	1'730	3'290

Sous notre climat, une puissance de 1 MWth (MégaWatt thermique) permet d'assurer le chauffage d'env. 200 équivalents-logements.

A ce jour, 82 pays utilisent la géothermie: Total = 70'000 MWth ; 163'000 GWh/an .

CONVERSION DE L'ÉNERGIE THERMIQUE EN ÉLECTRICITÉ (1)



Production d'électricité avec de la vapeur géothermale humide sous pression.

Gamme de température > 150 à > 300 ° C

CONVERSION DE L'ÉNERGIE THERMIQUE EN ÉLECTRICITÉ (2)

Centrale ORC à fluide binaire

- ORC = Cycle Organique de Rankine
- Fluide de travail organique à bas point de vaporisation: isobutane, isopentane, eau + ammoniac.
- 2 circuits fermés sous pression: aucune émission dans l'atmosphère.
- Efficacité de la conversion énergétique : 7 à 15 %.
- Coefficient d'utilisation : 95 à 98%.



Centrale ORC de Ribeira Grande, Açores

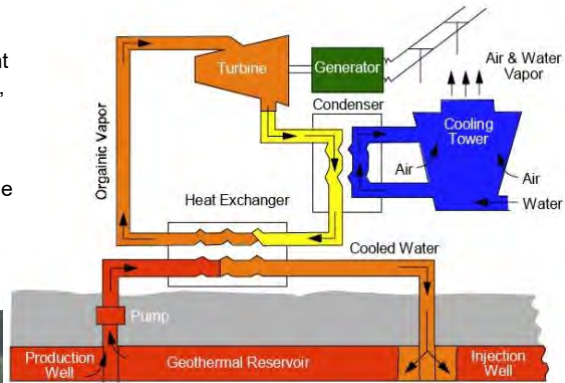
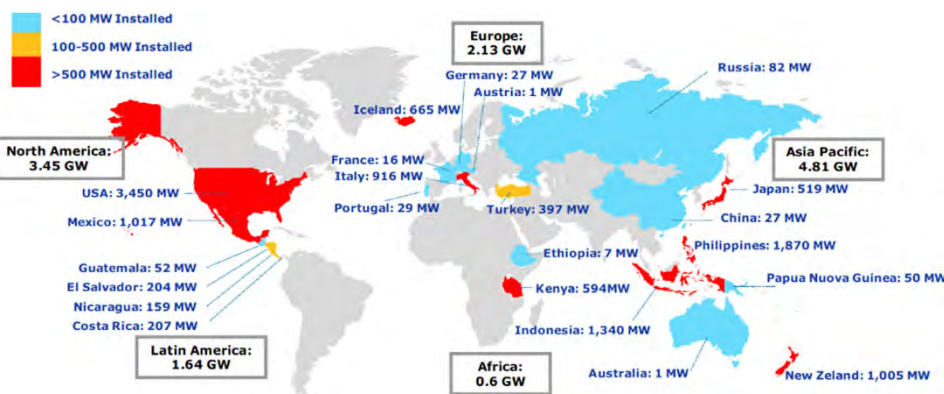


Schéma de fonctionnement d'une centrale géothermique à fluide binaire

Production d'électricité avec un fluide géothermal difficile (basse température, salinité extrême)

Gamme de température
env. 100 à > 300 ° C

PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ GÉOTHERMIQUE DANS LE MONDE



Puissance géothermique installée dans le monde en 2015 en MW électrique (Bertani, 2015)

Dans 26 pays: 12'600 MWe installés et 73'500 GWh/an produits. Plus de 70 millions d'habitants alimentés par l'électricité géothermique.

Une puissance de 1 MégaWatt électrique permet d'alimenter plus de 1'200 habitants en Suisse et env. 8'000 aux Philippines !

UTILISATION DE LA GÉOTHERMIE

Chiffres de 2016

- Dans le Monde
 - > 13'000 MW électriques de puissance installée dans 25 pays.
 - > 70'000 MW thermiques de puissance installée dans 82 pays.
- En Europe
 - > 2'000 MW électriques de puissance installée dans 8 pays.
 - > 32'000 MW thermiques de puissance installée dans 37 pays.
 - > 1.7 million PAC géothermiques.
- En Suisse
 - 0 MW d'électricité.
 - > 2'000 MW de chaleur (300'000 tonnes équivalent-pétrole substituées par la géothermie).



Unteraching (Bavière)
Electricité et chauffage



Rittershofen (Alsace)
Chaleur industrielle



Soutz-sous-Forêts (Alsace)
Électricité

U3a géothermie 2018/19

33

SITUATION DE LA GÉOTHERMIE EN SUISSE

Nombre d'installations

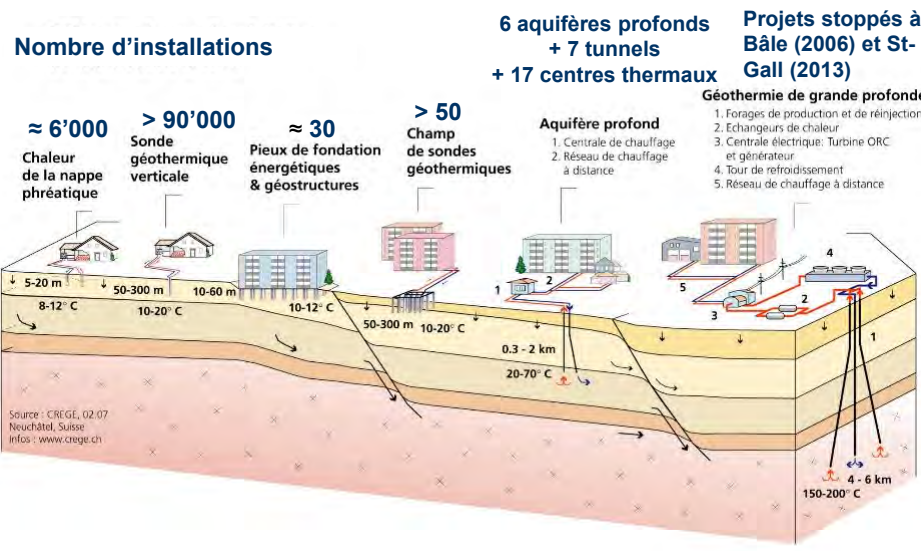
- ≈ 6'000 Chaleur de la nappe phréatique
- > 90'000 Sonde géothermique verticale
- ≈ 30 Pieux de fondation énergétiques & géostructures
- > 50 Champ de sondes géothermiques

6 aquifères profonds + 7 tunnels + 17 centres thermaux

Projets stoppés à Bâle (2006) et St-Gall (2013)

Géothermie de grande profondeur

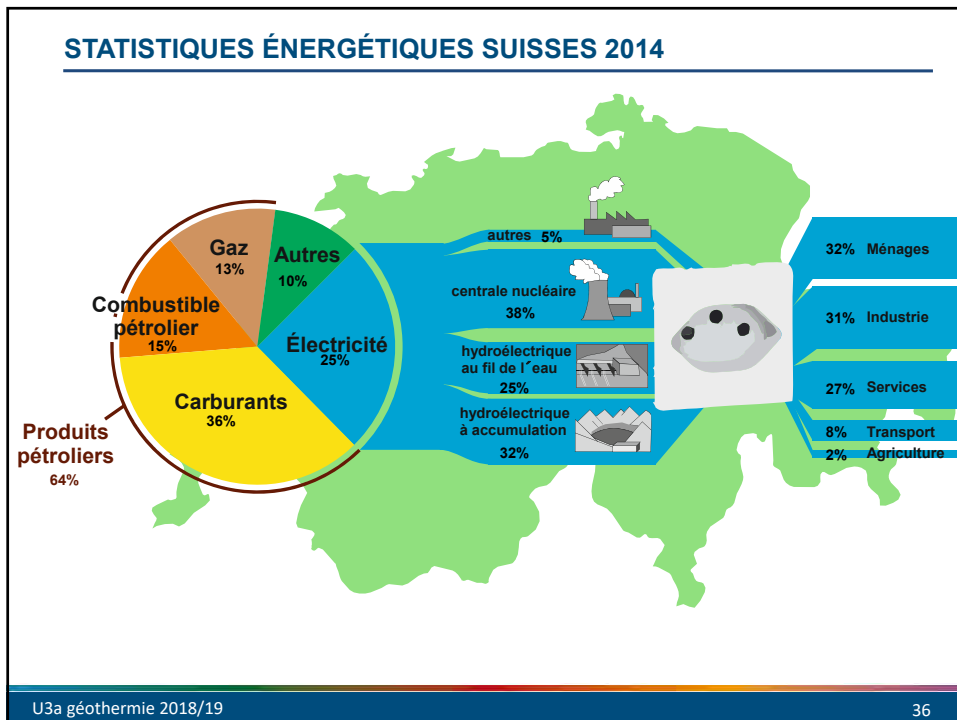
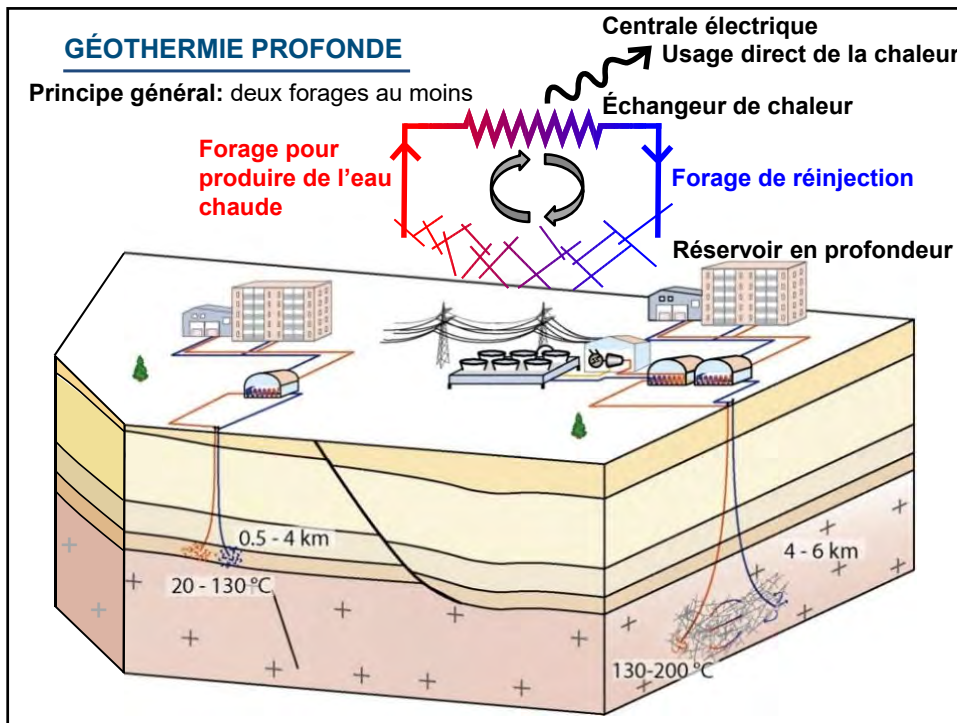
1. Forages de production et de réinjection
2. Echangeurs de chaleur
3. Centrale électrique: Turbine ORC et générateur
4. Tour de refroidissement
5. Réseau de chauffage à distance

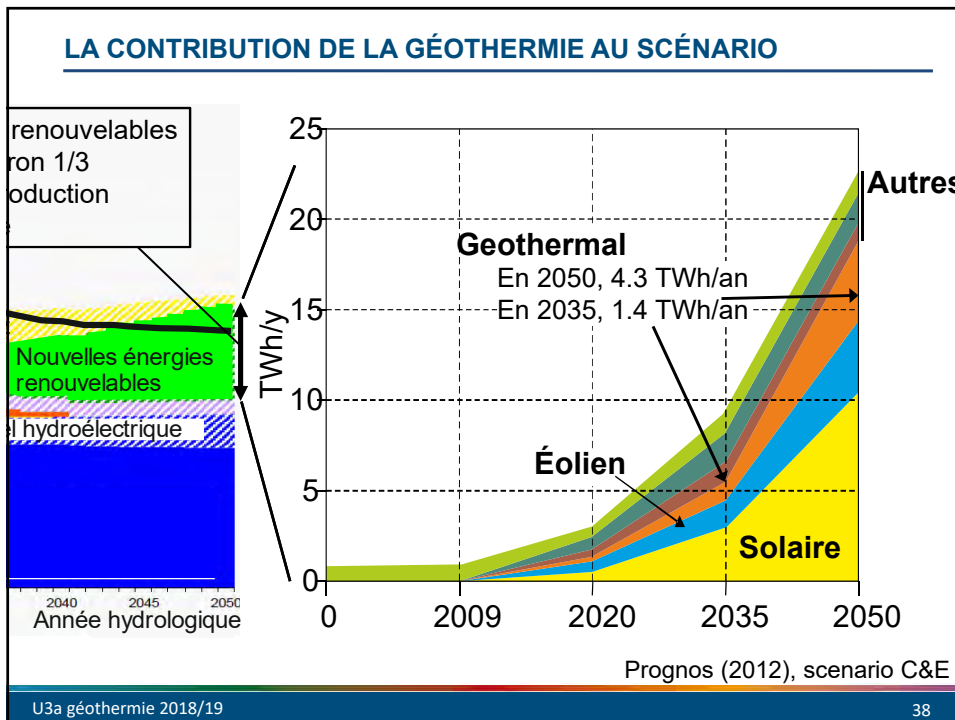
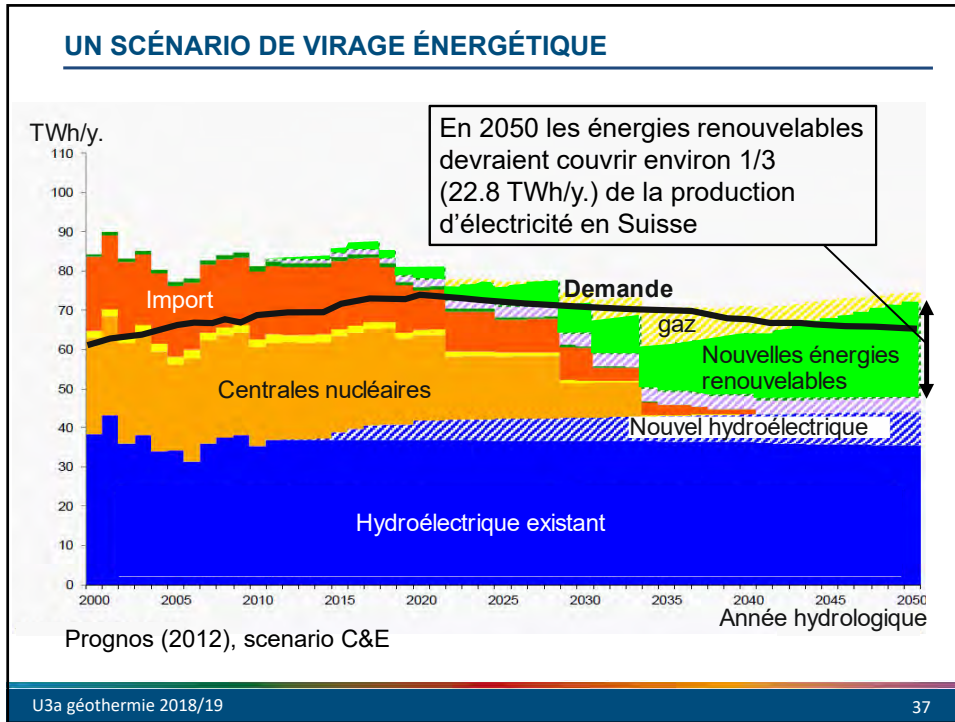


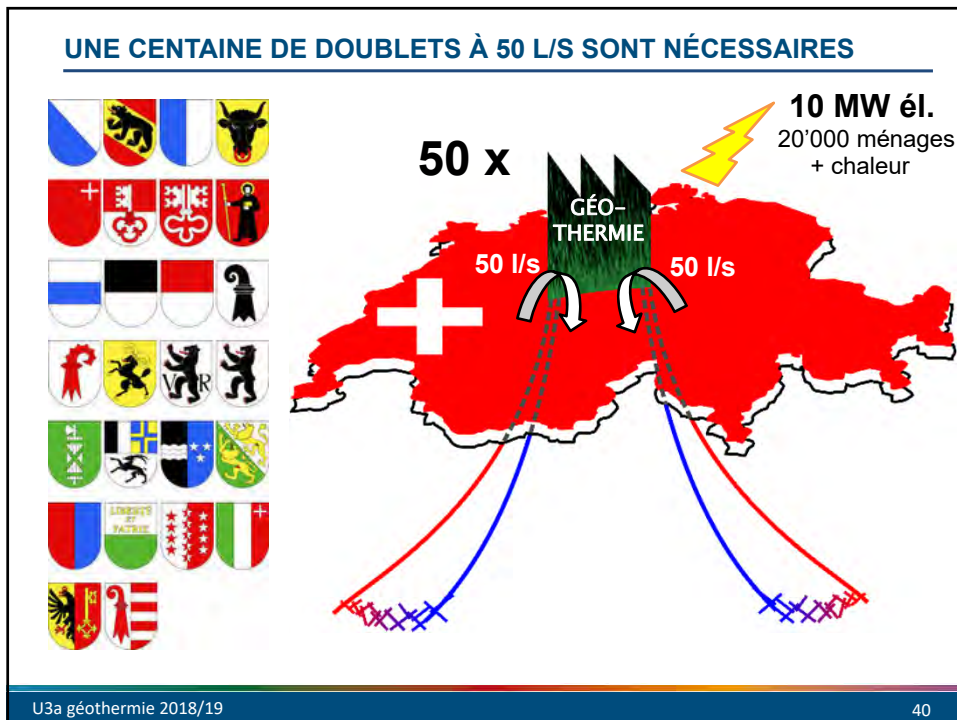
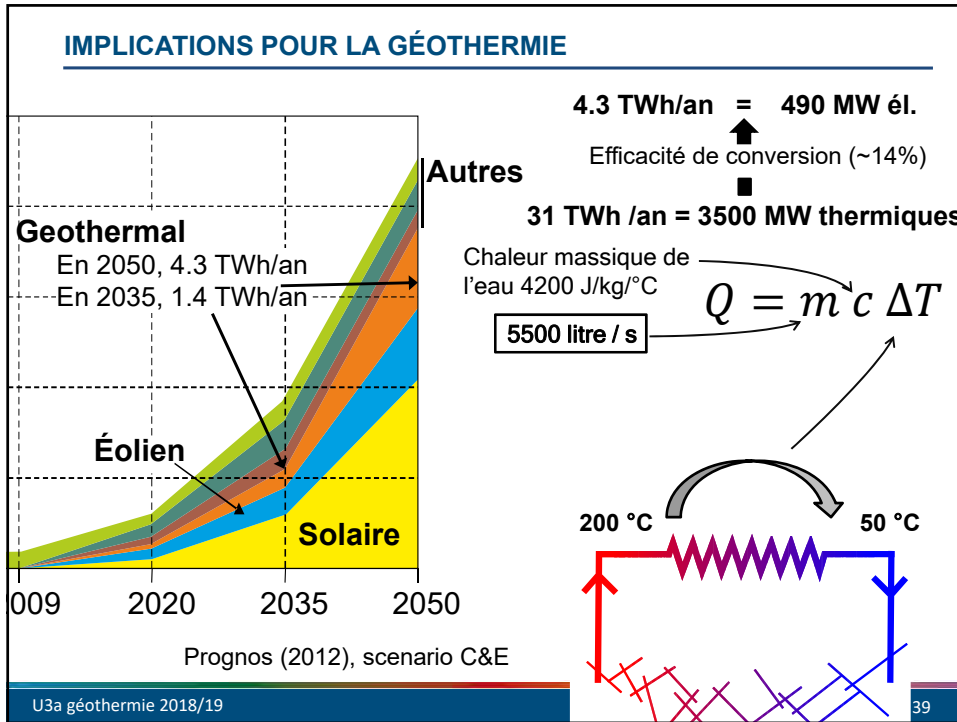
Source: CRIGE, 02.07 Neuchâtel, Suisse Infos: www.crige.ch

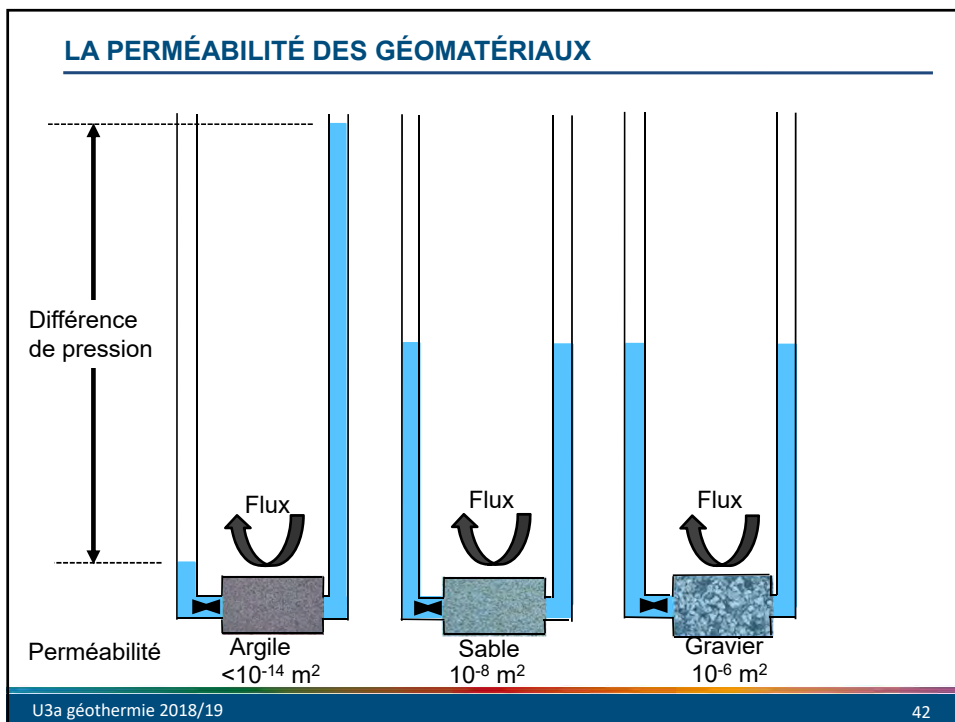
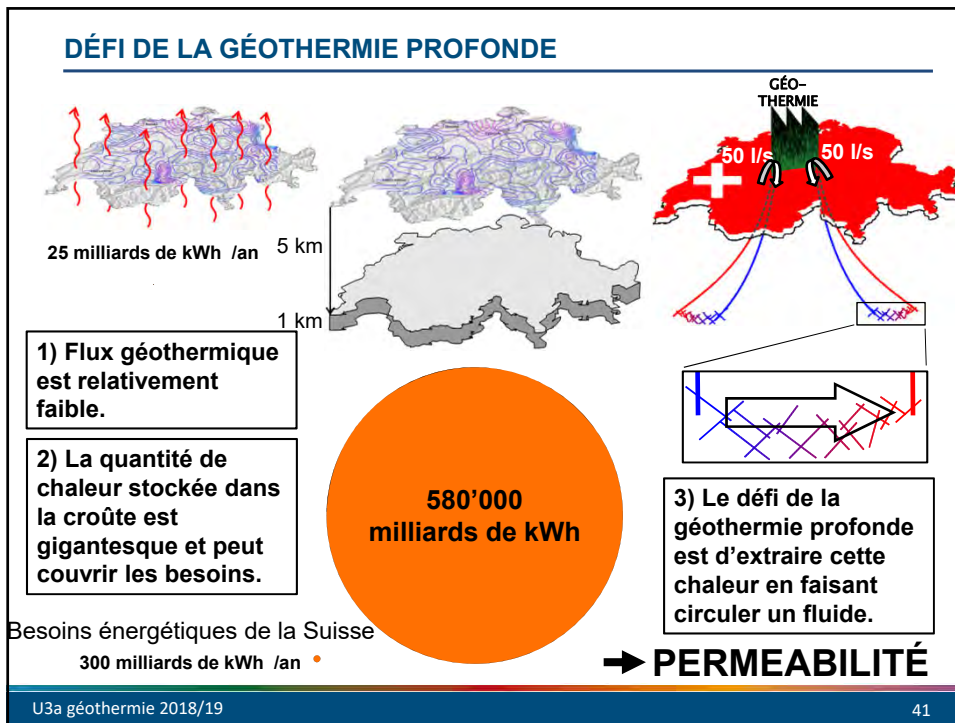
U3a géothermie 2018/19

34

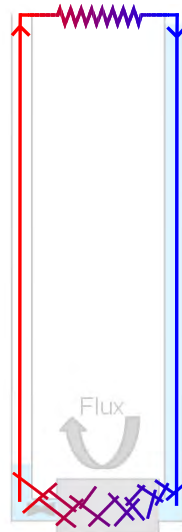




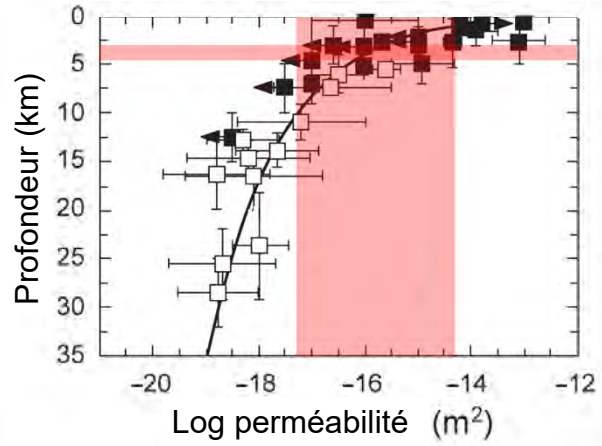




LA PERMÉABILITÉ DES GÉOMATÉRIAUX



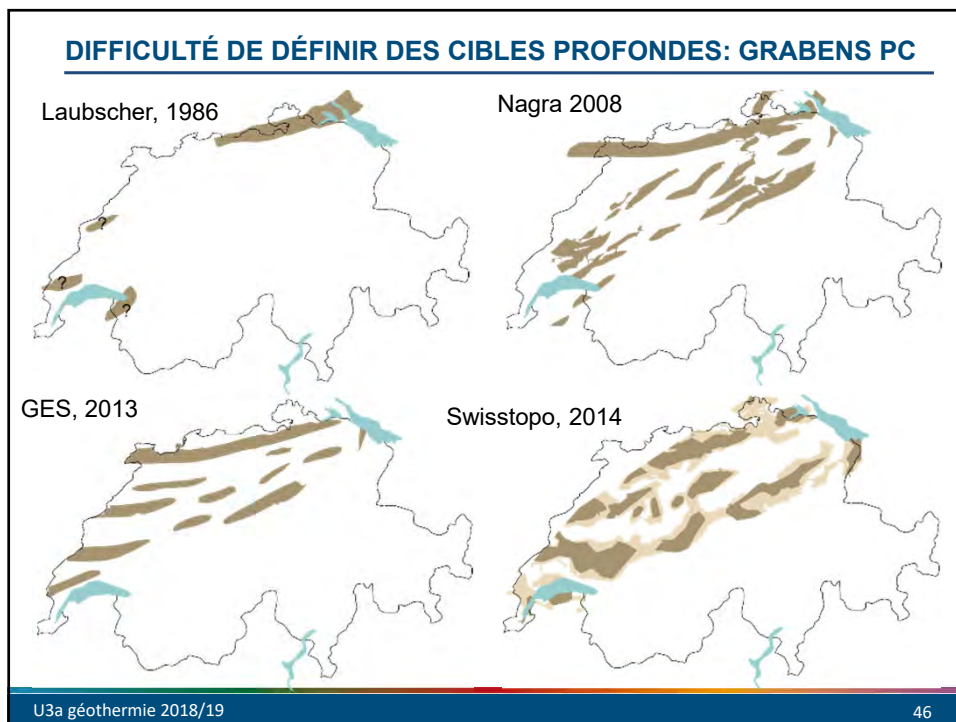
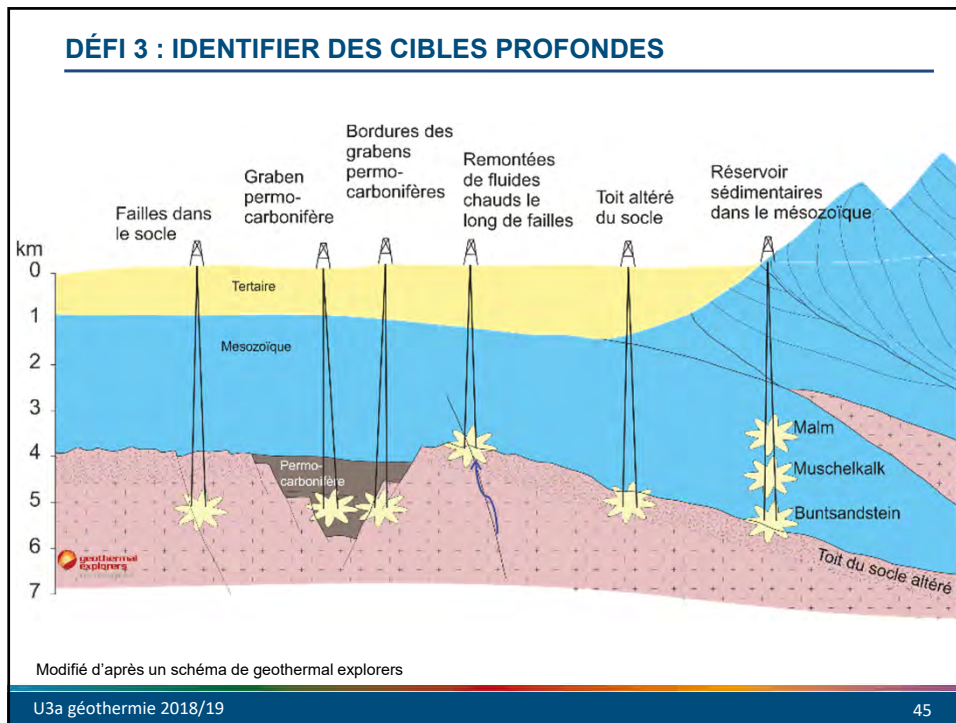
En profondeur, la perméabilité naturelle est généralement faible

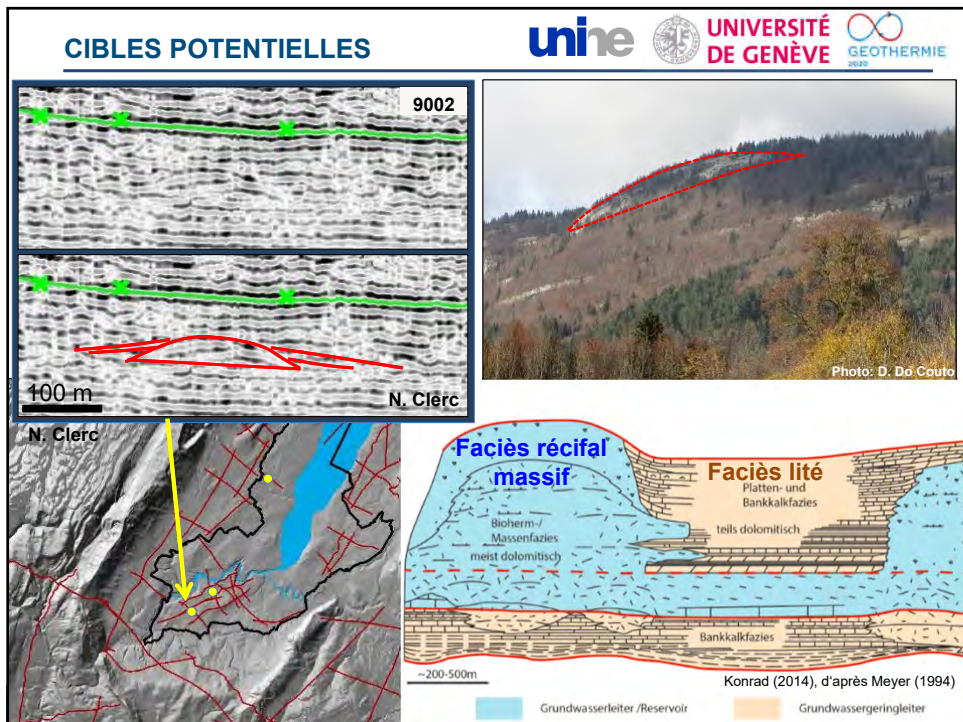
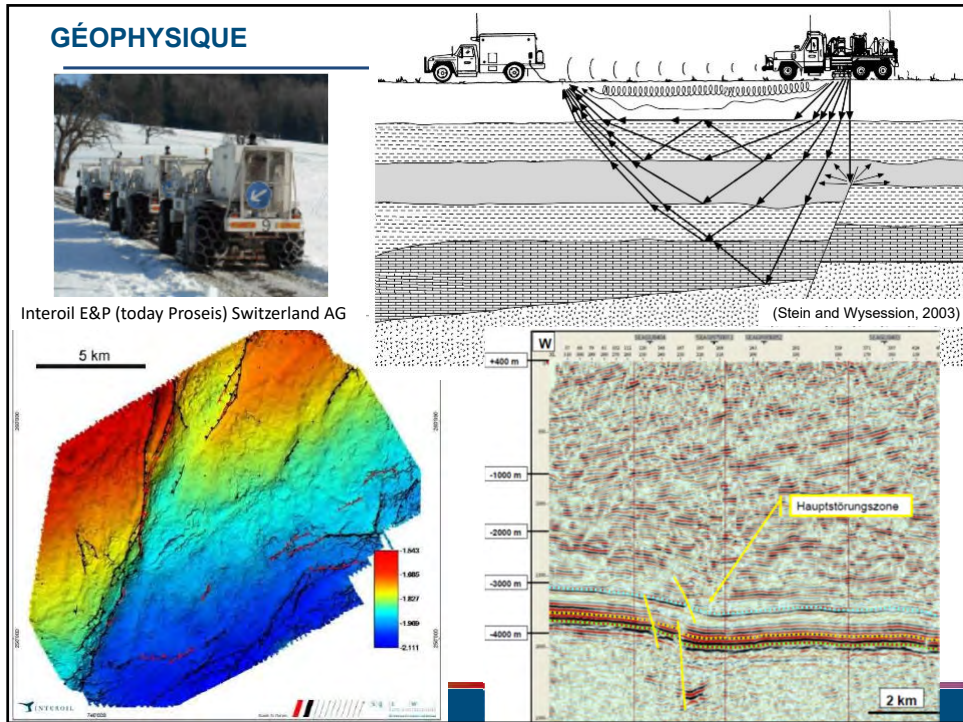


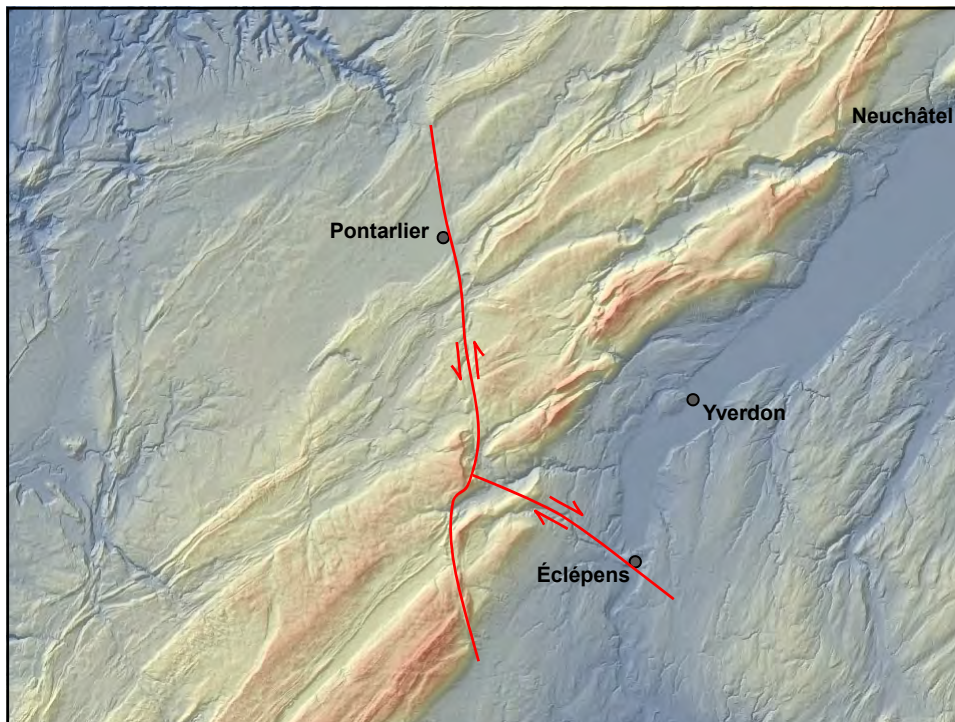
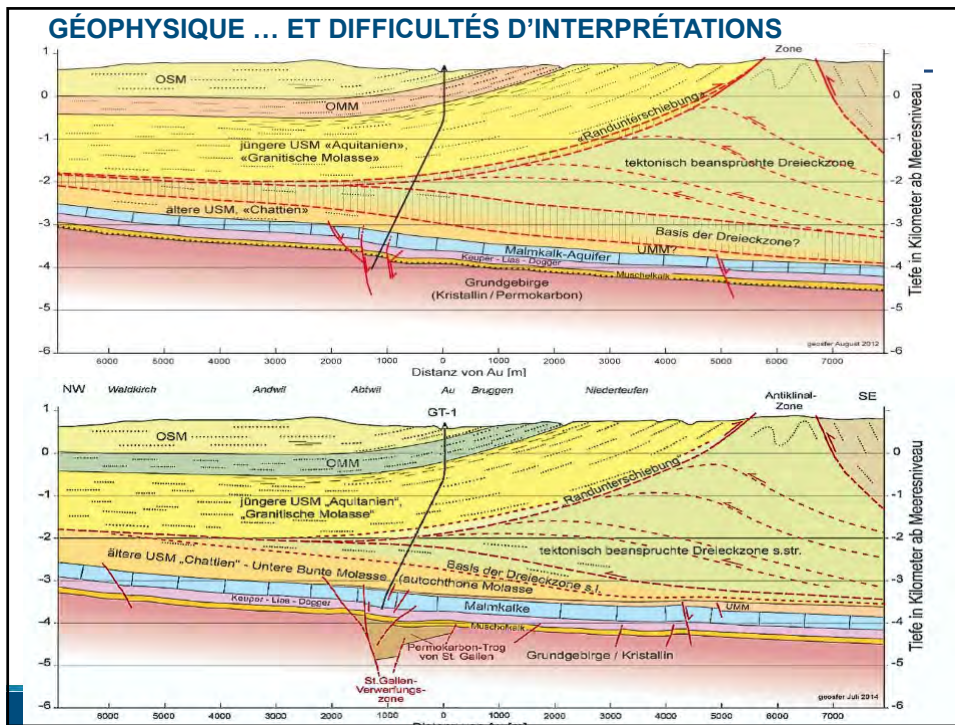
Manning & Ingebritsen (1999) *Rev. Geophys.* 37 (1), 127-150.

DÉFI 3 : IDENTIFIER DES CIBLES PROFONDES









ANATOMIE DES ZONES DE FAILLES

Projet en collaboration avec l'Université de Fribourg et sponsorisé par Swisstopo.

UNI FR **u**ine **+** **+** **+** swisstopo

Diagram labels: cœur de faille, zone endommagée, Caine (1996)

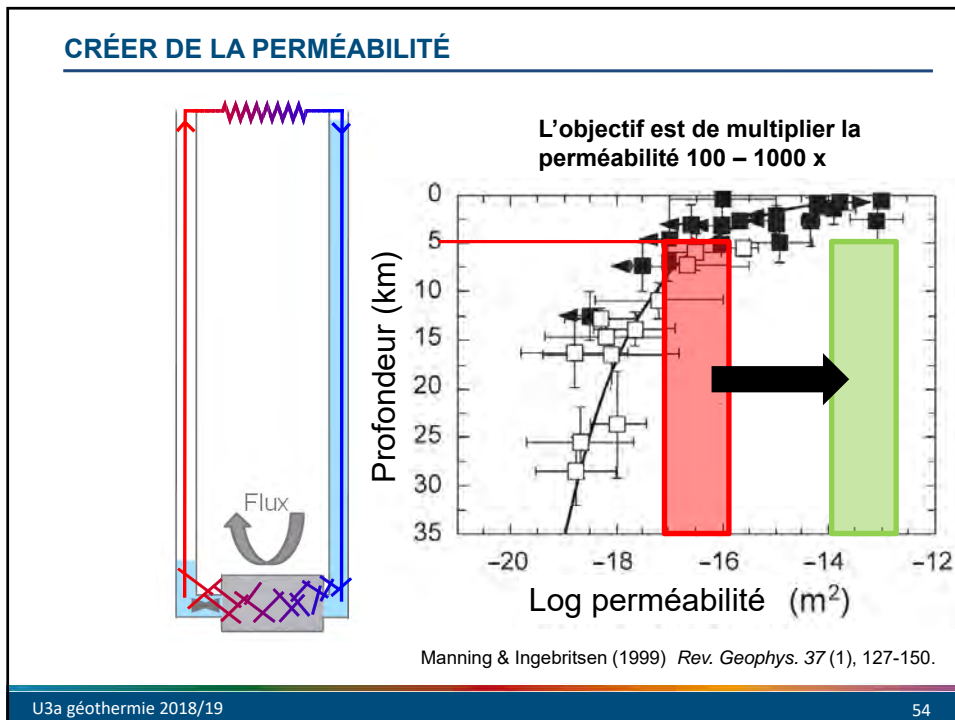
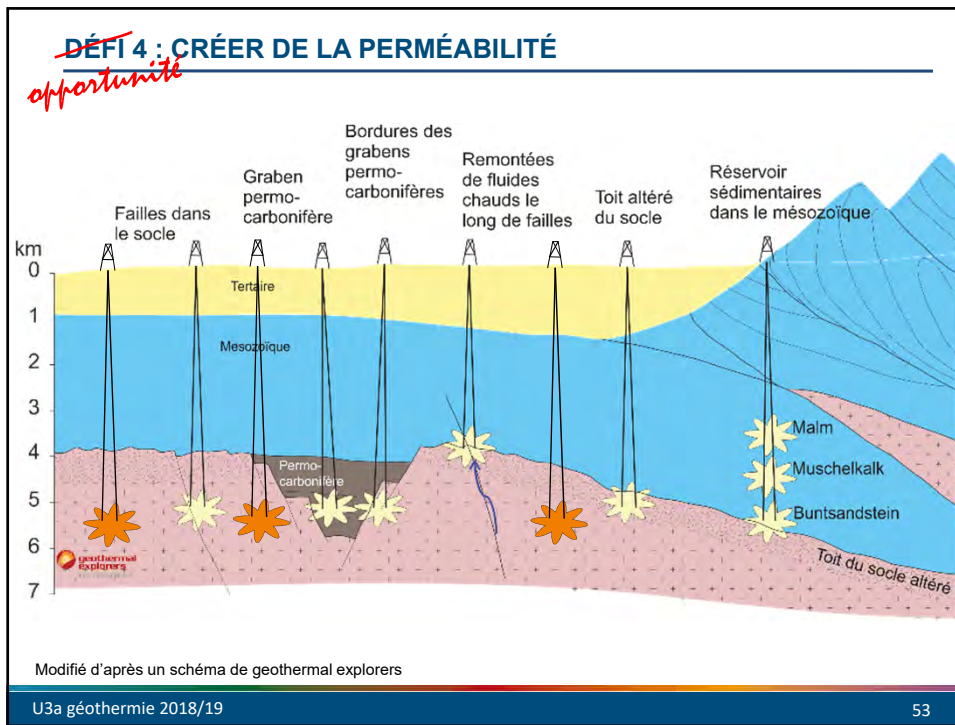
Photograph labels: Tiefenstein, Forêt-Noire, Plan de faille, Zone endommagée, Éclépens

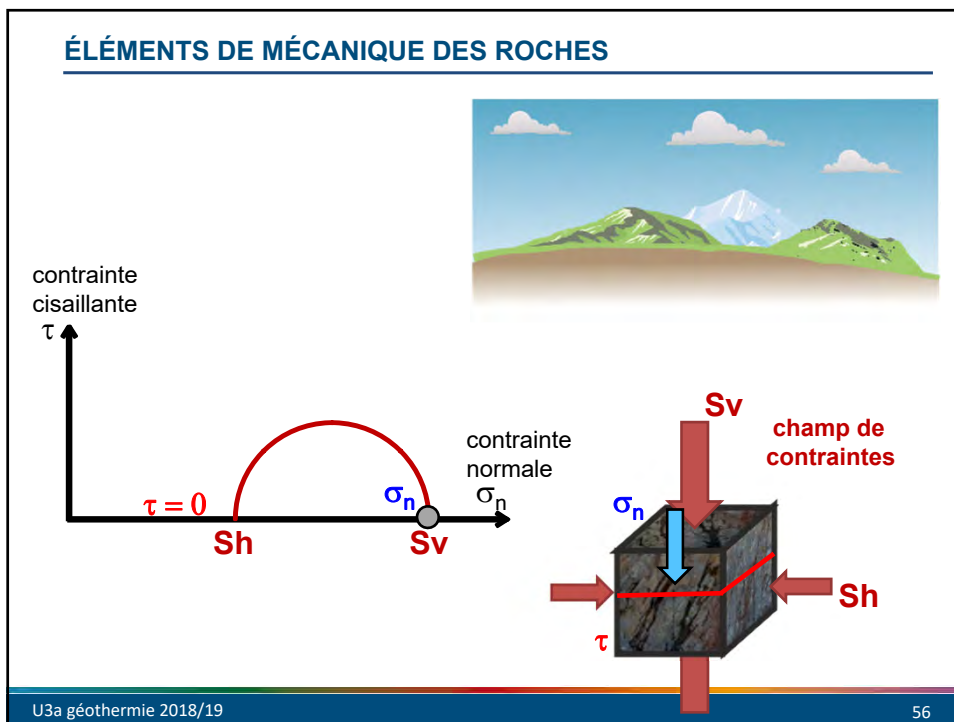
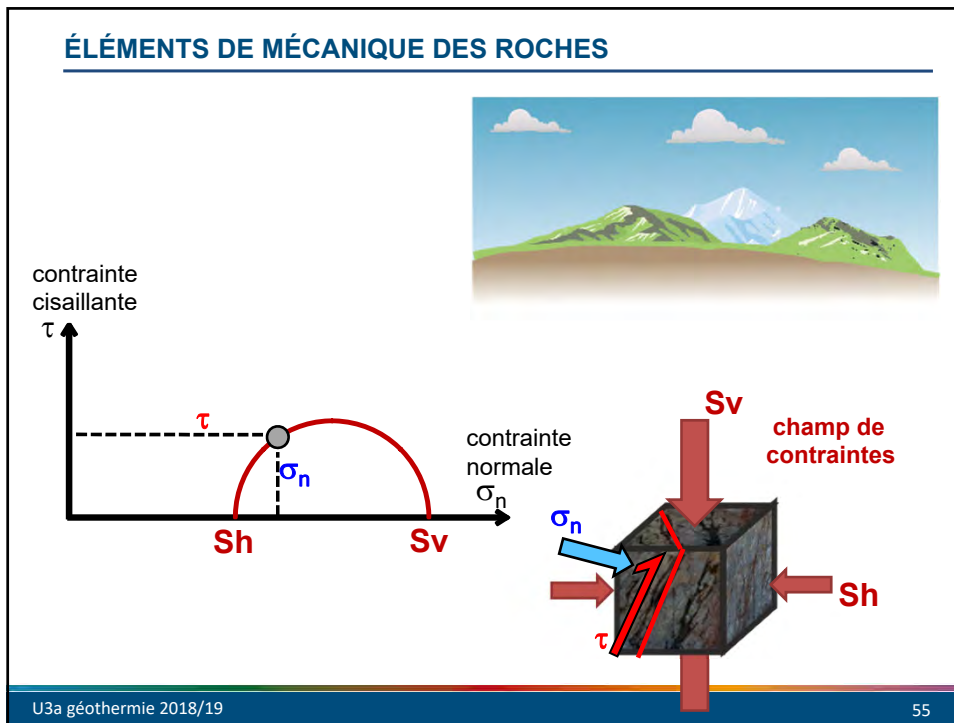
Photograph label: Éclépens

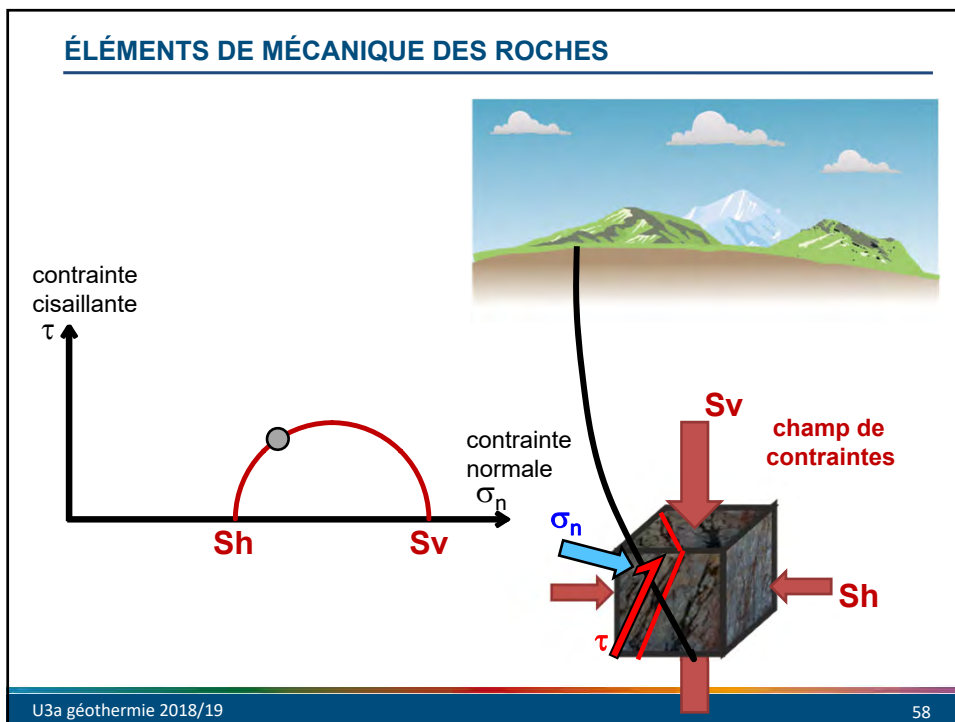
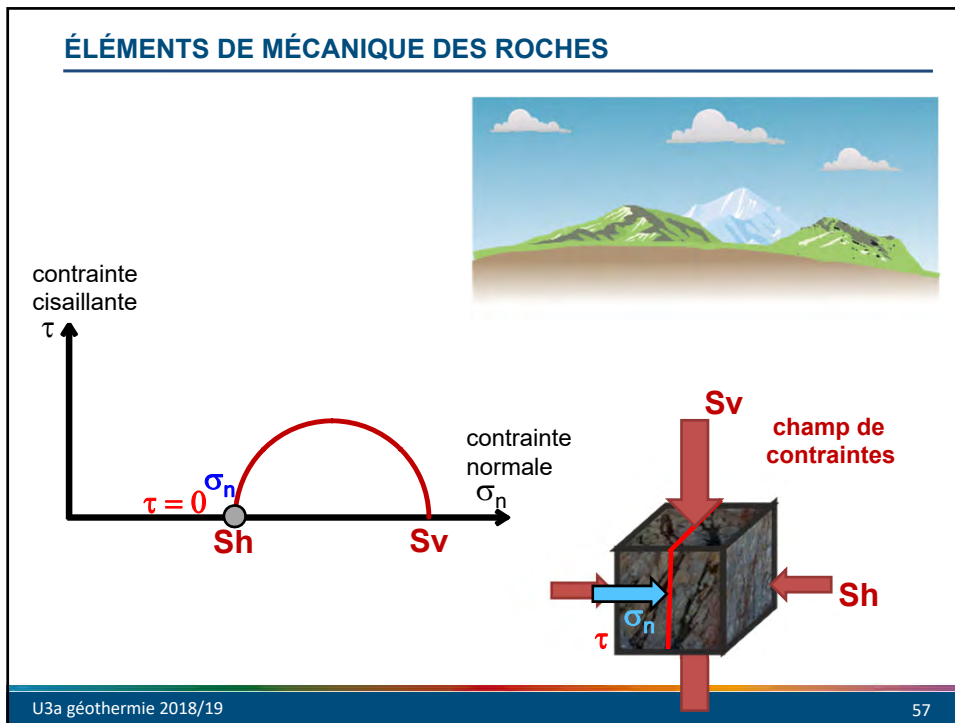
DÉFI 4: CRÉER DE LA PERMÉABILITÉ

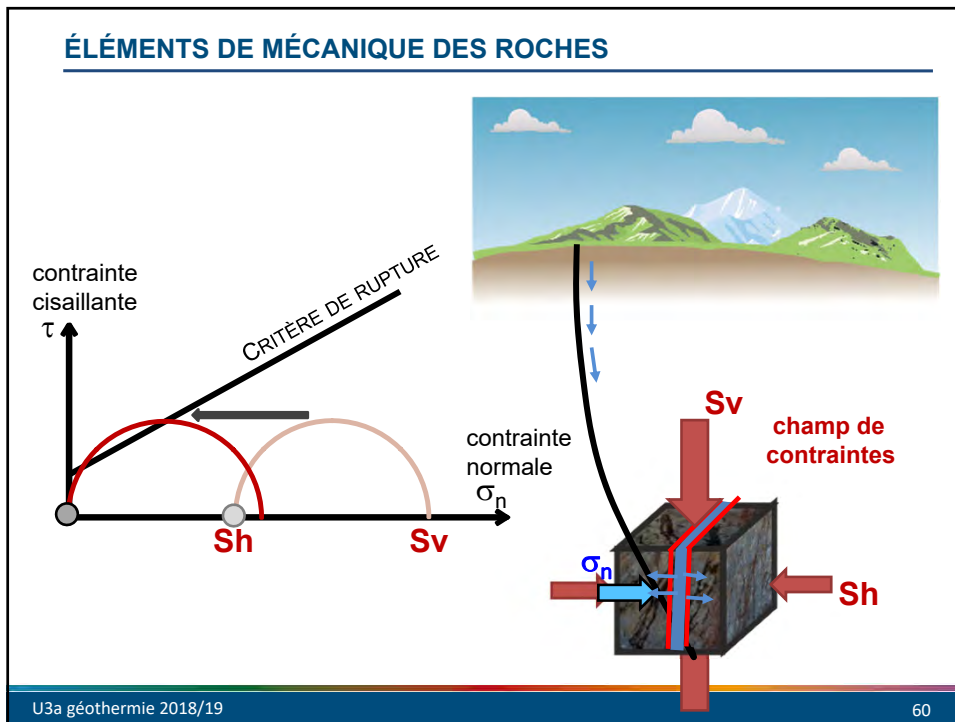
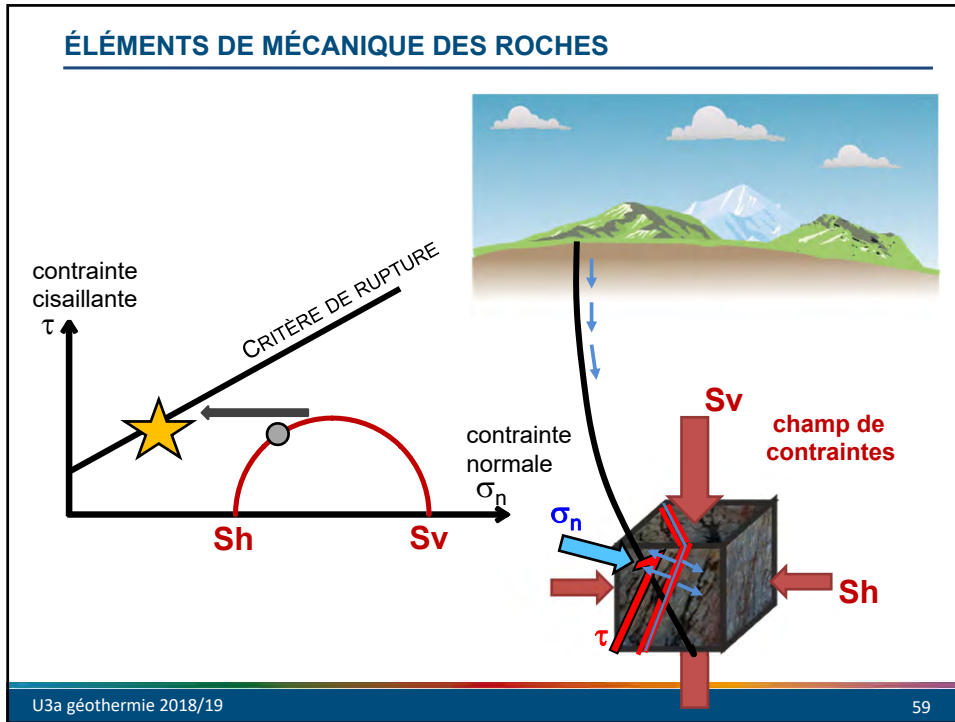
Detail of Michelangelo's 'The Creation of Adam' showing a crack in the rock with red arrows pointing to it.

U3a géothermie 2018/19 52

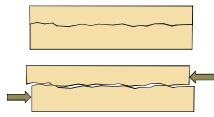




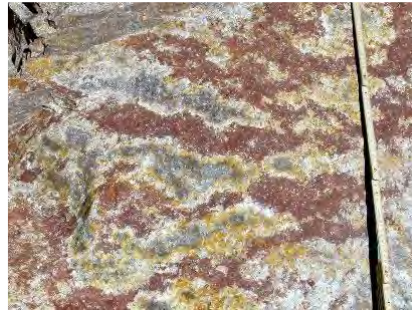




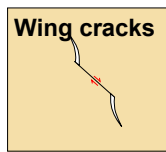
MÉCANISMES DE CRÉATION DE PERMÉABILITÉ



Cisaillement de fractures rugueuses



Wieslet, Forêt-Noire



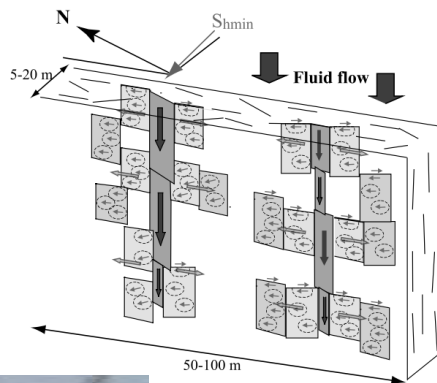
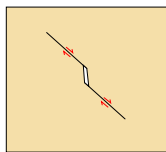
Wing cracks



Oman
(photo: RWTH Aachen)

MÉCANISMES DE CRÉATION DE PERMÉABILITÉ

Fractures en relais et structure en "pull-apart"

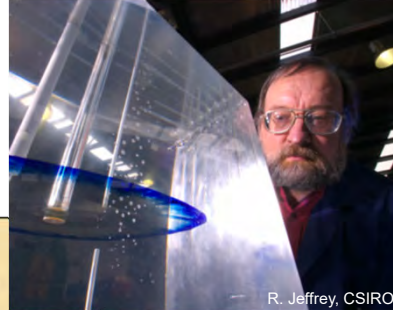
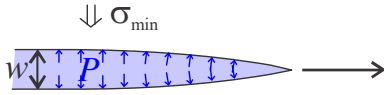


Evans et al. 2005 G.J.I. 160. 388-412

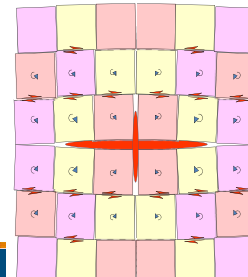
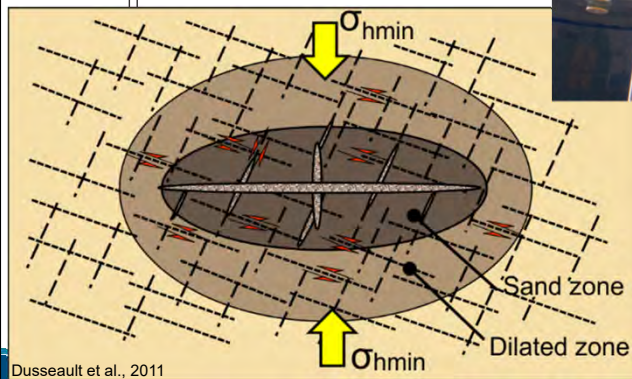


MÉCANISMES DE CRÉATION DE PERMÉABILITÉ

Fractures hydrauliques

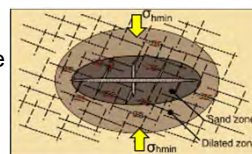
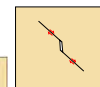
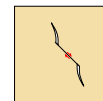


R. Jeffrey, CSIRO




QUESTIONS AUTOUR DE LA CRÉATION DE PERMÉABILITÉ

- Quels processus dominent dans le réservoir ?
- Quels processus permettent de développer une perméabilité de manière non réversible ?
- Quels gains (quantitatif) de perméabilité obtient-on par ces différents processus ?
- Quel est la sismicité associée à ces processus ?
- Comment peut-on influencer ces processus, le gain de perméabilité et la sismicité induite en modifiant la stratégie d'injection (volumes, débits, pressions, viscosité, "completion",...)?
- Peut-on simuler et prédire le résultat d'une stimulation hydraulique ? Quelle physique inclure ? Comment évaluer les paramètres de simulation ?




CENTRES SUISSES DE COMPÉTENCE EN RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE




SWISS COMPETENCE CENTER for ENERGY RESEARCH
SUPPLY of ELECTRICITY


Mise à disposition de l'électricité en ruban

- Géothermie profonde
- Hydroélectrique
- Stockage CO₂




Shaping the Future Swiss Electrical Infrastructure







Energy, Society and transition
SCCER CREST




mobility



Biomass for Swiss Energy Future
Swiss Competence Center for Energy Research



EFFICIENCY OF INDUSTRIAL PROCESSES




Swiss Competence Center for Energy Research

U3a géothermie 2018/19

65

CENTRES SUISSES DE COMPÉTENCE EN RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE




SWISS COMPETENCE CENTER for ENERGY RESEARCH
SUPPLY of ELECTRICITY


Mise à disposition de l'électricité en ruban

- Géothermie profonde
- Hydroélectrique
- Stockage CO₂

Academic Research Partners

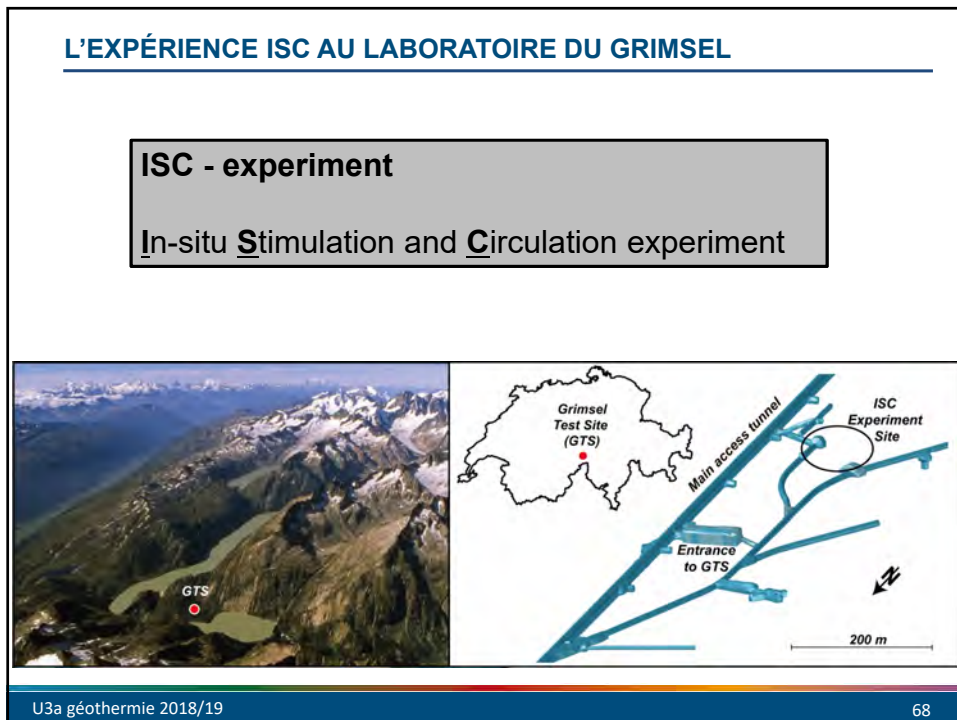
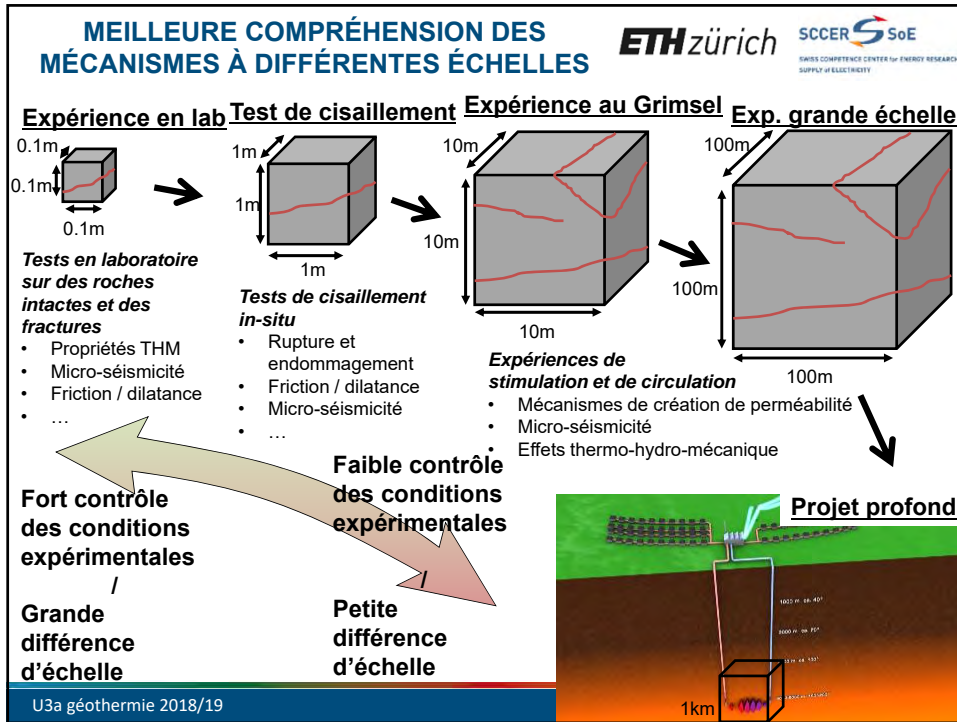


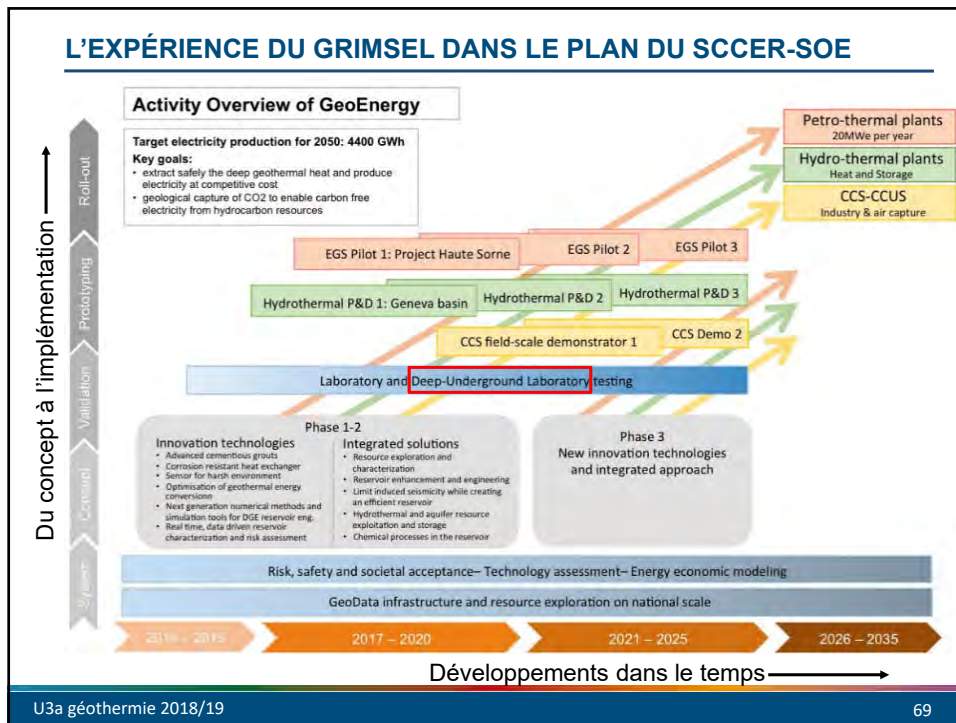
Cooperation Partners



U3a géothermie 2018/19

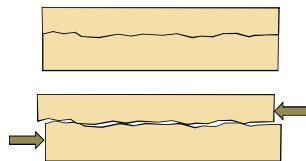
66





MOTIVATIONS

Comment **créer** un réservoir géothermique (échangeur de chaleur) tout en maintenant la sismicité induite sous un seuil acceptable ?



Cisaillement de fractures naturellement rugueuses

MOTIVATIONS

Comment **créer** un **réservoir géothermique** (échangeur de chaleur) tout en maintenant la sismicité induite sous un **seuil acceptable** ?



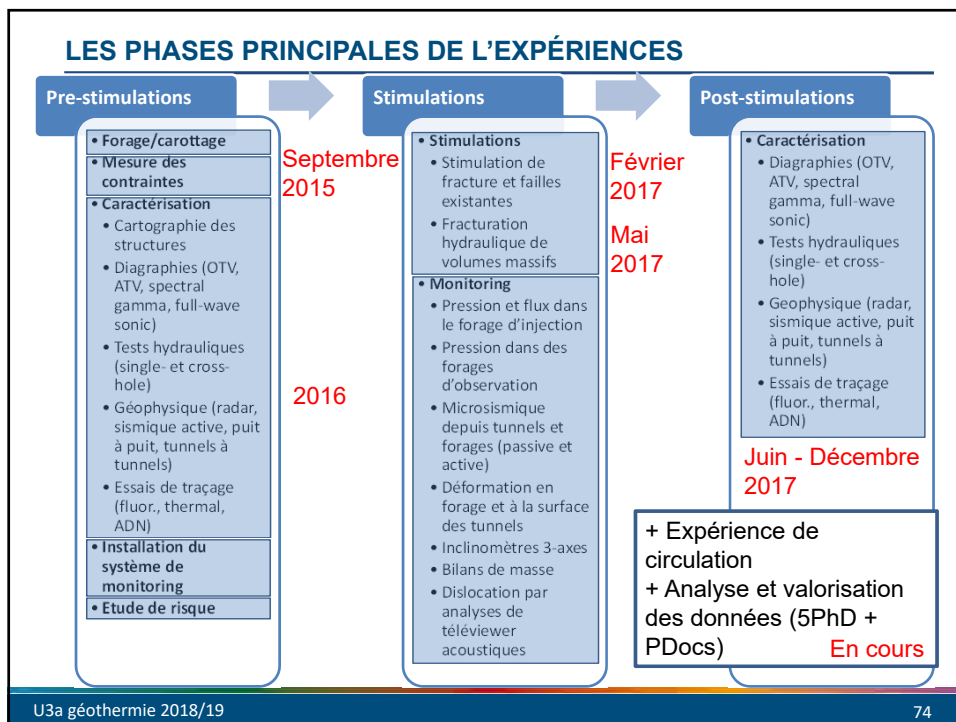
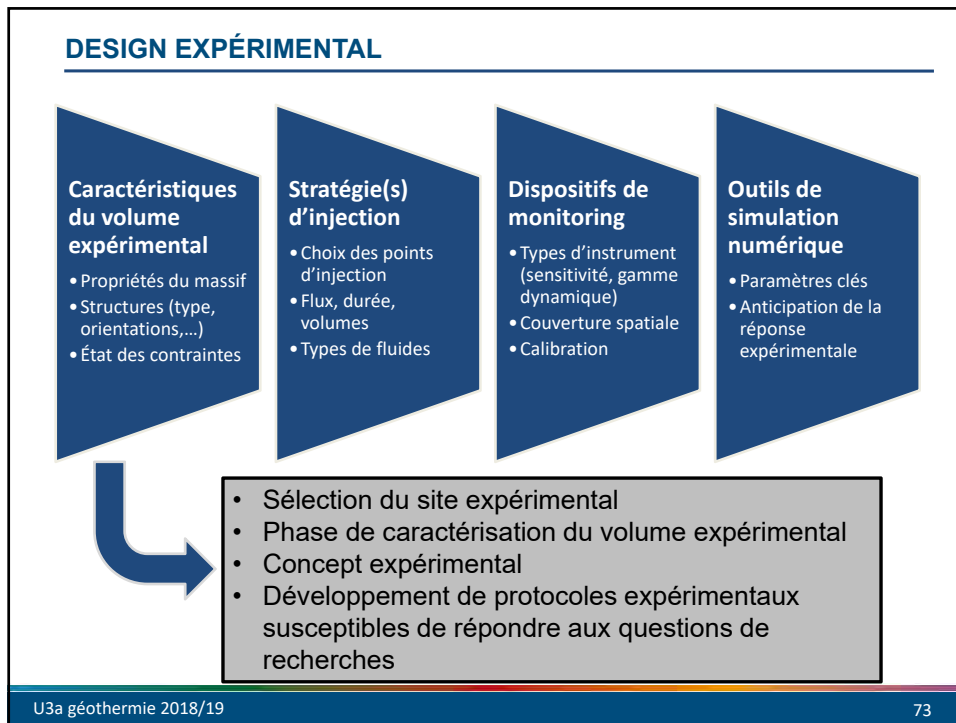
Nécessaire de dépasser les concepts de base pour fournir des **résultats quantitatifs**

- Quelle est la distribution spatiale et temporelle des **pressions de fluide** dans le réservoir ?
- Quel est la **déformation du massif** résultant de la pressurisation et du glissement des fractures ?
- Comment les **contraintes** changent lors de la stimulation et quelle est leur **influence** sur la stimulation ?
- Peut-on quantifier la part de déformation **asismique** et **sismique** ?
- Quel est l'influence de l'**orientation relative** des structures géologiques et des contraintes sur l'**efficacité de la stimulation** et la **sismicité induite** ?
- Quel est la part de **réactivation** de fractures naturelles et de **création de nouvelles fractures** durant la stimulation est quelle est leur effets respectifs en terme de **sismicité** et de **création de perméabilité** ?
- Peut-on capturer **quantitativement** les **observations expérimentales** dans des **simulations numériques** ?

MOTIVATIONS

Répondre aux questions ci-dessous par:

- Une expérience in-situ, décamétrique, en roches cristallines
 - Accès exceptionnel au volume expérimental, monitoring dense et complet
 - Focus sur une compréhension fondamentale et quantitative des processus
- Quelle est la distribution spatiale et temporelle des **pressions de fluide** dans le réservoir ?
 - Quel est la **déformation du massif** résultant de la pressurisation et du glissement des fractures ?
 - Comment les **contraintes** changent lors de la stimulation et quelle est leur **influence** sur la stimulation ?
 - Peut-on quantifier la part de déformation **asismique** et **sismique** ?
 - Quel est l'influence de l'**orientation relative** des structures géologiques et des contraintes sur l'**efficacité de la stimulation** et la **sismicité induite** ?
 - Quel est la part de **réactivation** de fractures naturelles et de **création de nouvelles fractures** durant la stimulation est quelle est leur effets respectifs en terme de **sismicité** et de **création de perméabilité** ?
 - Peut-on capturer **quantitativement** les **observations expérimentales** dans des **simulations numériques** ?



CARACTÉRISATION DU VOLUME EXPÉRIMENTAL

Forage: A worker in a red protective suit is operating a drilling rig in a dark, confined space.

Traçage thermique: A worker in a pink jacket and orange safety vest is handling equipment with various cables and sensors.

Téléviewer: Three workers in orange safety vests are examining a long, cylindrical tool or probe.

Sismique active: A long, brightly lit tunnel with various pipes and equipment along the walls.

Radar: A worker in a green jacket is using a yellow radar device on the wall of a tunnel.

U3a géothermie 2018/19 75

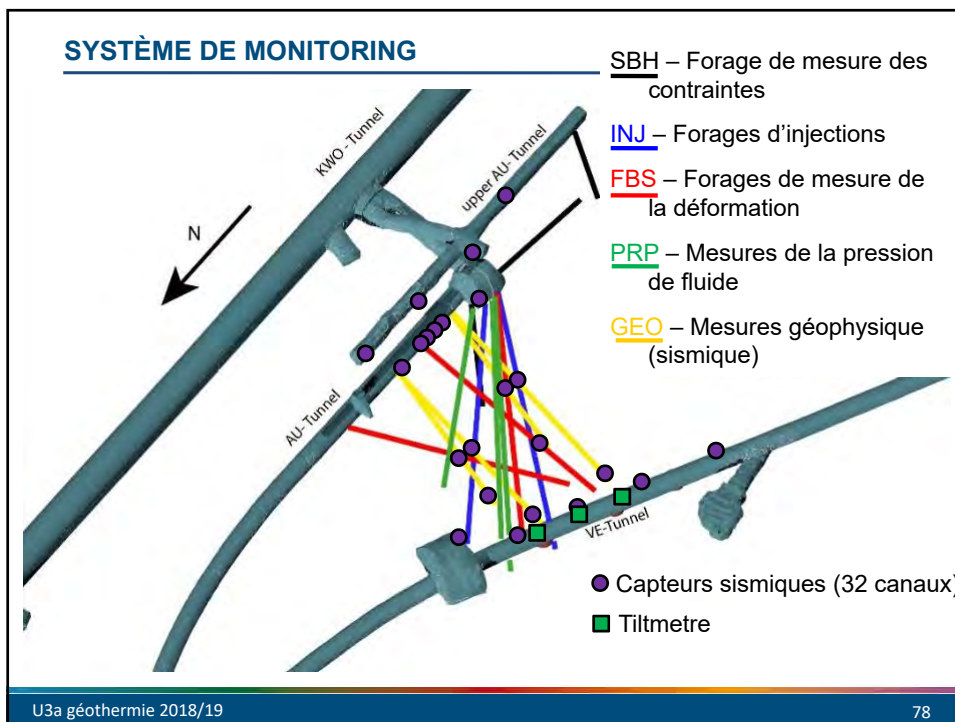
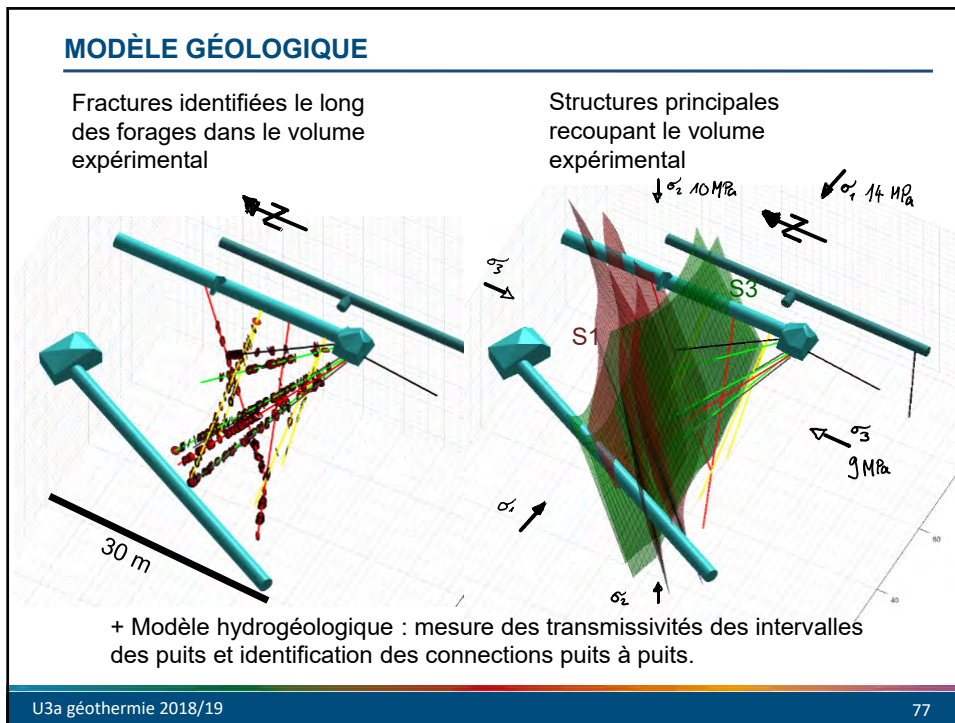
CARACTÉRISATION DU VOLUME EXPÉRIMENTAL

Tests hydrauliques entre packers multi-intervalles: A laboratory or field setup with various pipes, valves, and monitoring equipment.

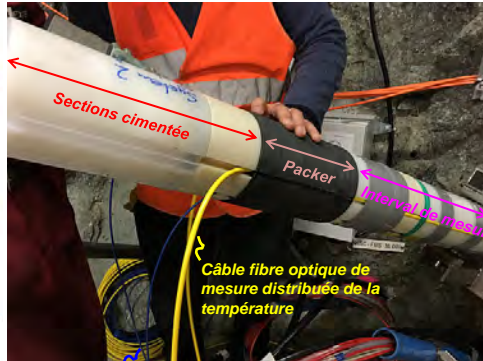
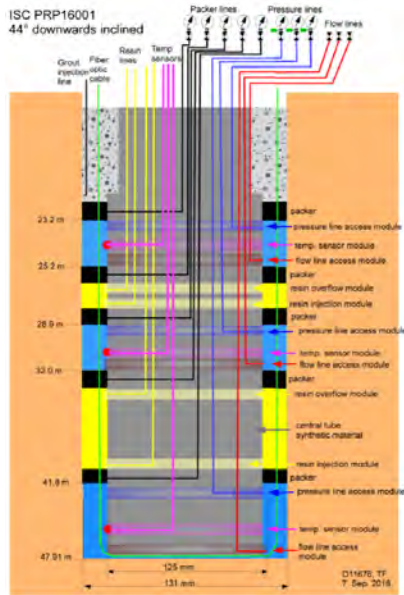
Mesure des contraintes par surcarottage: A close-up view of a metal pipe being cut by a diamond-tipped tool.

Essai de traçage: A worker in an orange safety vest is managing a complex network of colorful cables and sensors.

U3a géothermie 2018/19 76



FORAGE DE MESURE DE LA PRESSION DE FLUIDE (PRP)



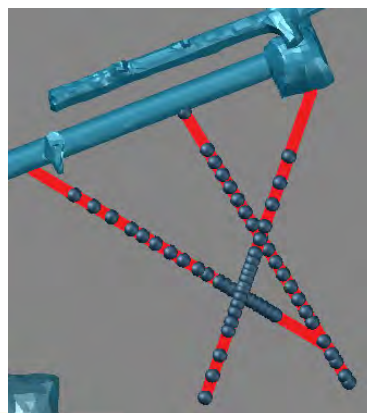
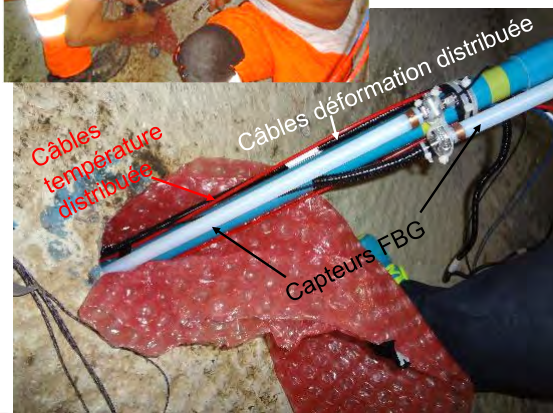
Câble fibre optique de mesure distribuée de la température

- Intervalles de mesures séparé par des packers
- Point de mesure pour la pression et pour la température
- Mesure distribuée de la déformation et de la température par fibre optique

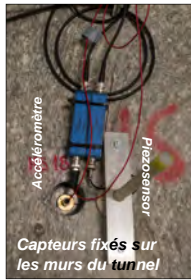
FORAGES DE MESURE DE LA DÉFORMATION



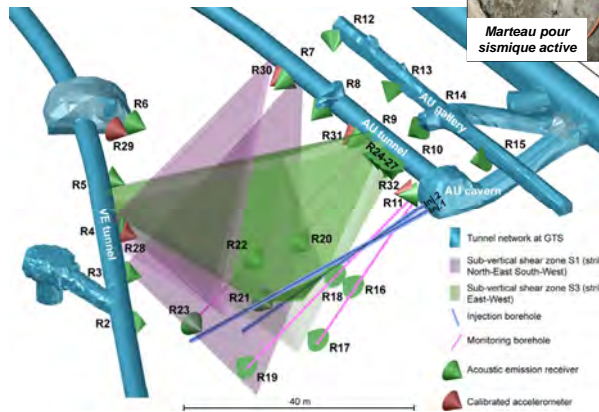
- Mesure ponctuelle de la déformation (FBG Fiber Bragg Grating) - [0.1 με, 1000 Hz]
- Mesure distribuée de la déformation (BO-TDA) - [10 – 50 με]
- Mesure distribuée de la température



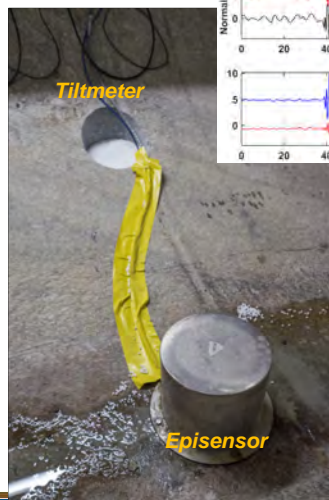
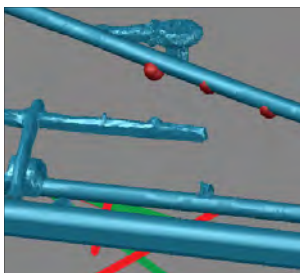
SYSTÈME DE MONITORING SISMIQUE



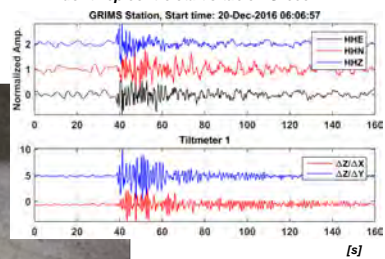
- Systèmes 32 canaux automatique et continu
- Echantillonné à 200 Hz
- 8 sources actives marteau et 2 piézosource dans les forages



MESURE DES CHANGEMENT D'INCLINAISON (TILT)



Enregistrement d'un tremblement de terre dont l'épicentre était situé en Grèce



- 3 tiltmeter de type Jewell instruments 711-2A
- Résolution 0.1 μ rad
- Mesure les changement d'inclinaison dans deux direction perpendiculaire

PROTOCOLES D'INJECTION

2 séries de test distinct:

➤ Tests de réactivation en cisaillement (hydroshearing)

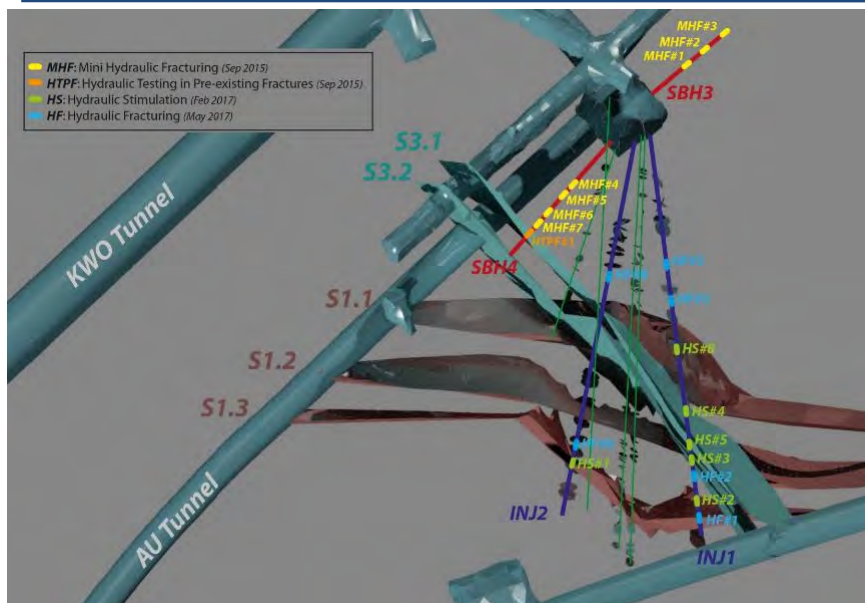
- Injection dans des fractures/failles
- Protocole unique, variabilité des zones injectées
- 6 tests effectués en février 2017

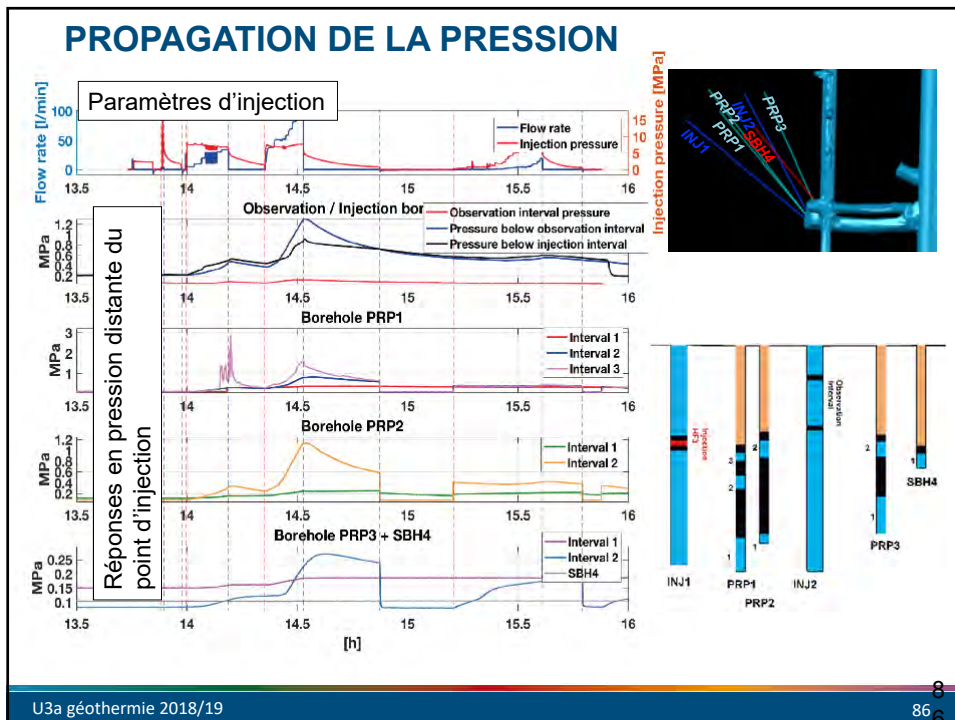
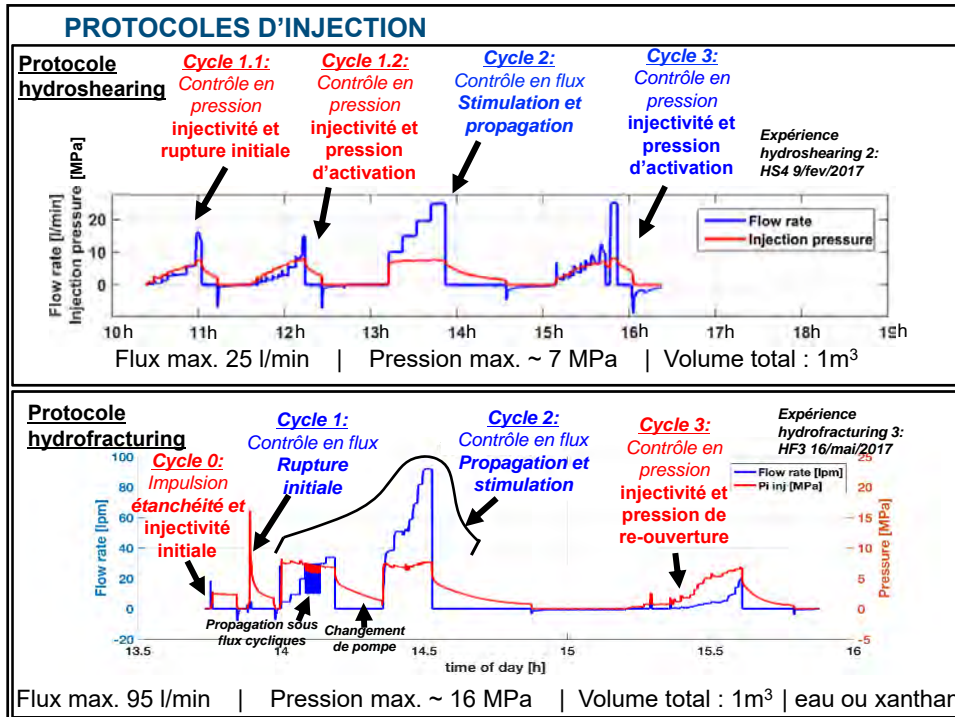
➤ Tests de fracturation hydraulique

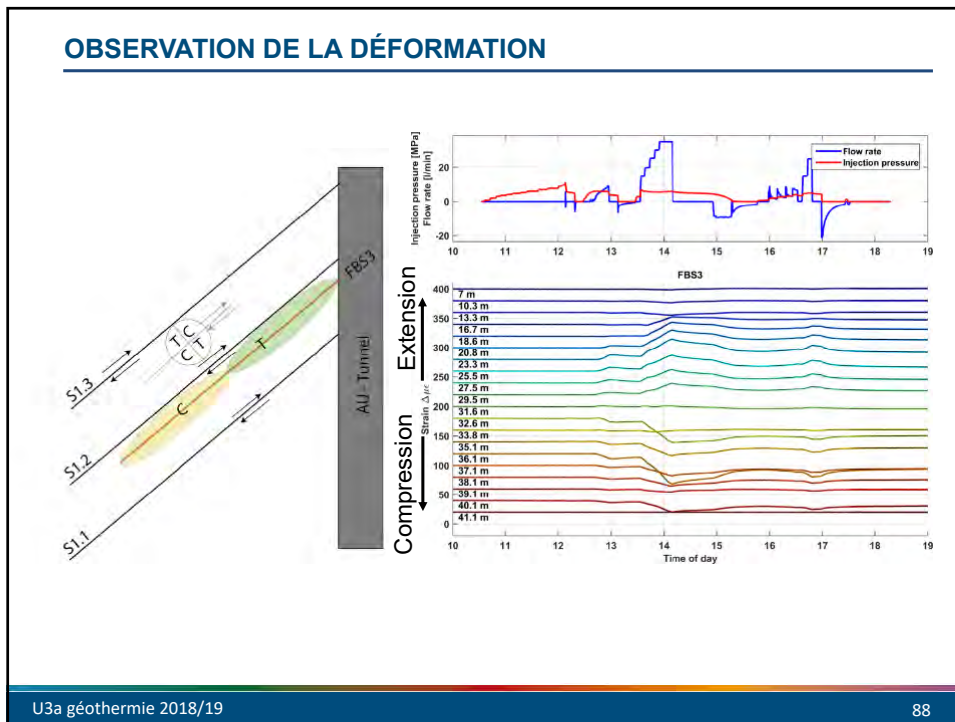
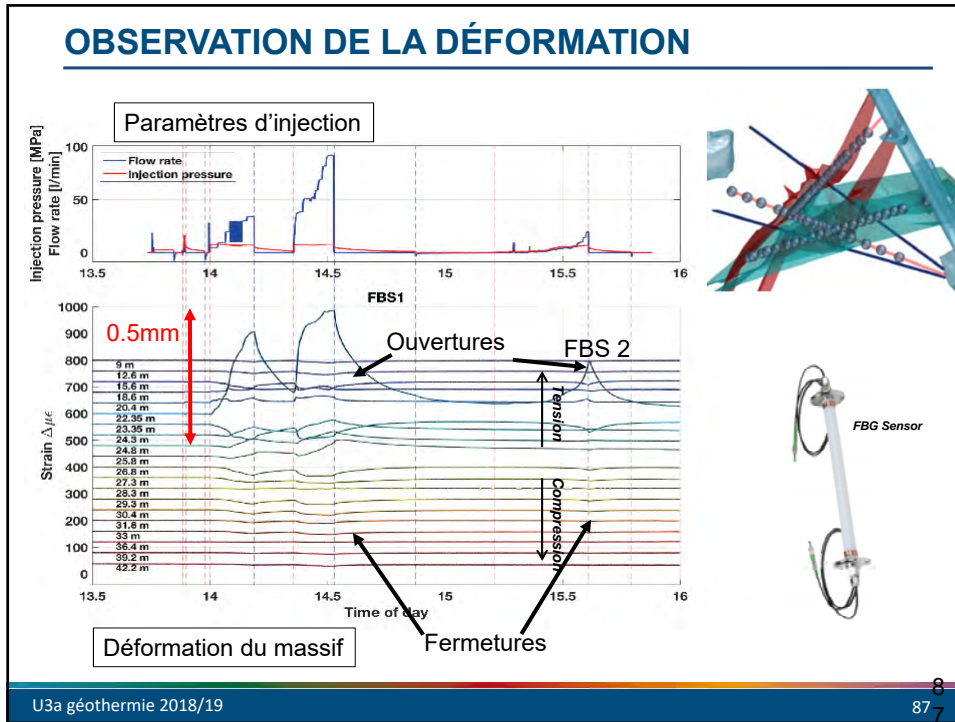
- Injection sur des intervalles intacts
- Protocole avec deux fluides différents
- 6 test effectués en mai 2017



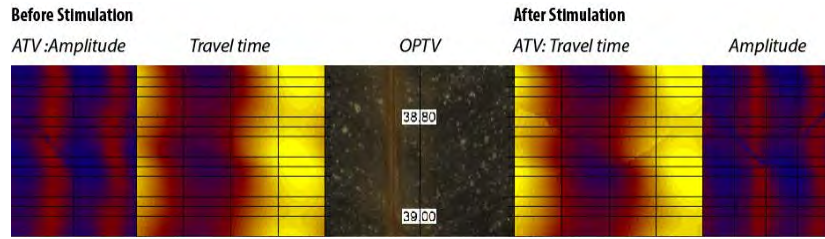
COMMON EXPERIMENTAL INFRASTRUCTURE FOR RESEARCH



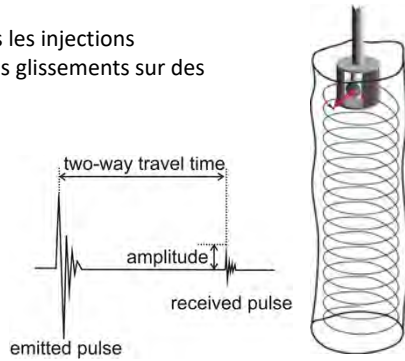




OBSERVATION DU GLISSEMENT AU NIVEAU DU FORAGE

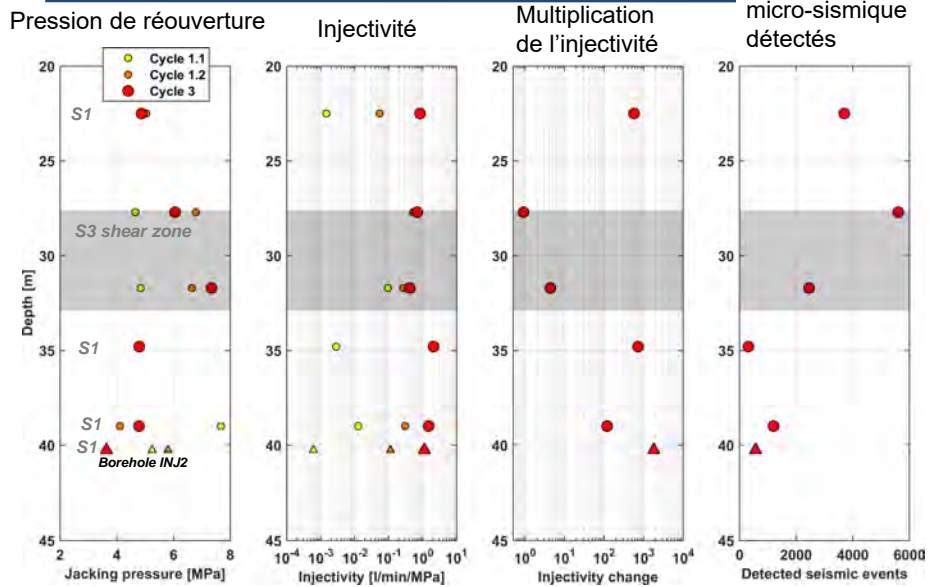


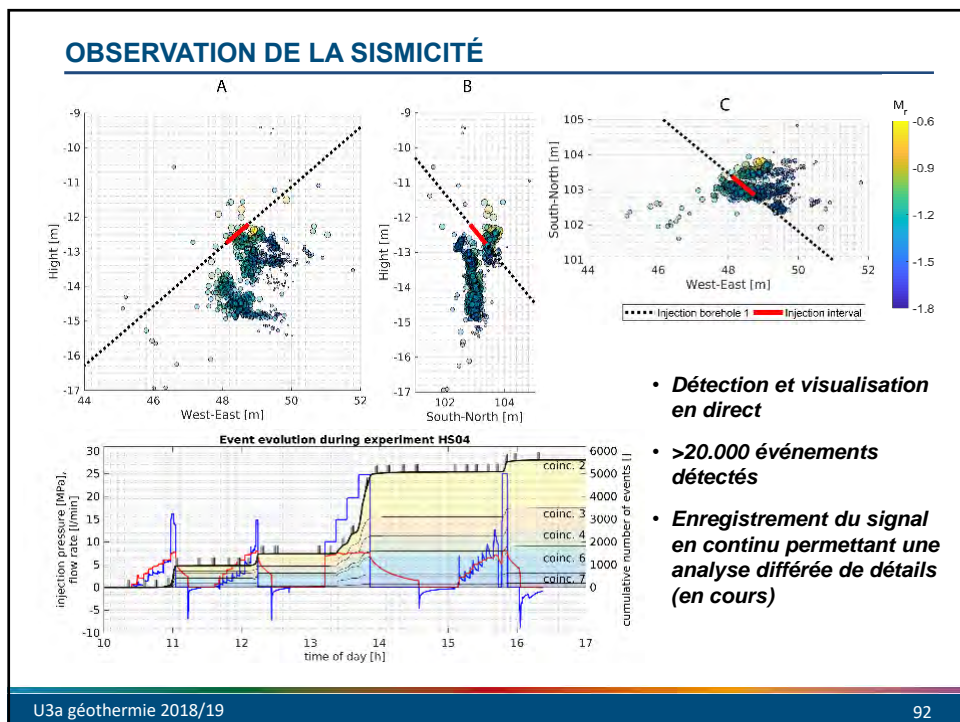
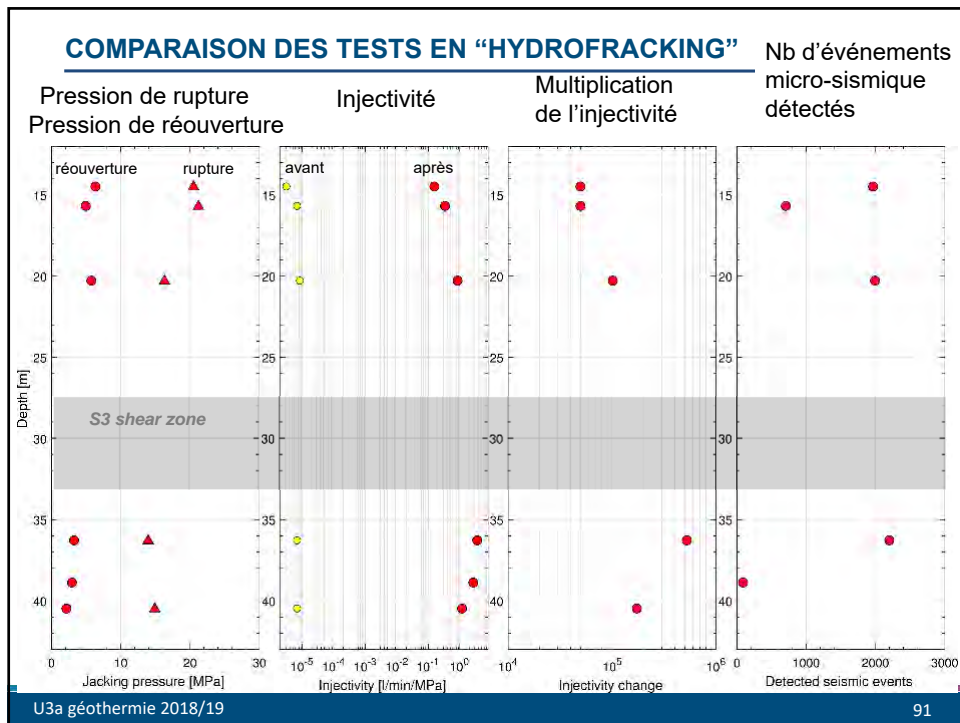
- Des images des forages avant et après les injections permettent de mettre en évidence des glissements sur des fractures, ici de ~ 1.5 mm



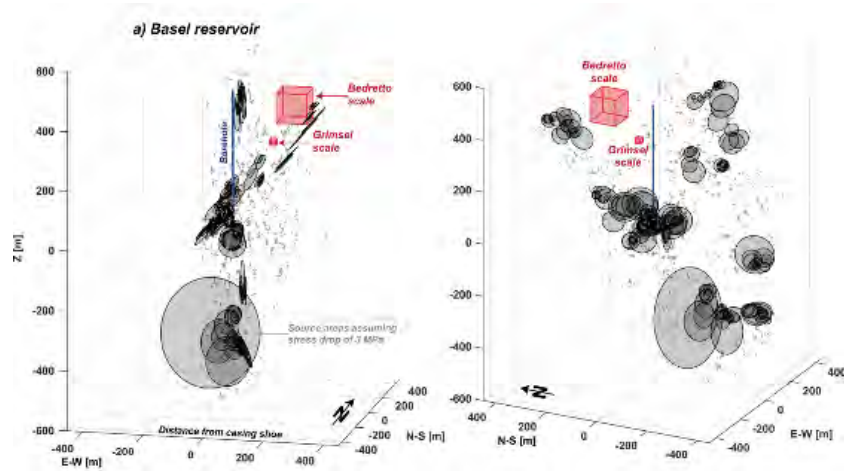
COMPARAISON DES TESTS EN "HYDROSHEARING"

Nb d'événements micro-sismique détectés





DES QUESTIONS D'ÉCHELLE



Source: V. Gischig

U3a géothermie 2018/19

93

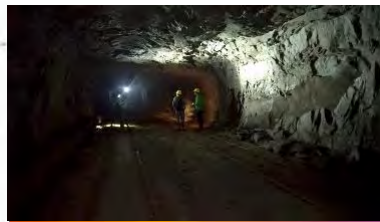
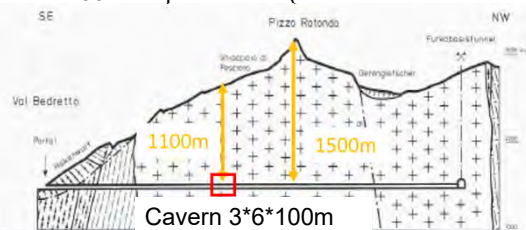
PERSPECTIVES EXPÉRIMENTALES

- Exécution d'une expérience unique en milieu cristallin
- Toutes les injections prévues ont été réalisées sans incidents
- Tous les systèmes de mesure ont fonctionné (seul. 2 capteur ont mal fonctionné) et on enregistré des signaux clairs en réponse aux injections
- 2 ans de caractérisations / expérimentations
 - Gros jeu de donnée
- Analyses en cours (5 PhD + PDocs)



Suivi en direct des paramètres expérimentaux

- Développement de nouvelles expériences dans la galerie de Bedretto
1100m de profondeur (niveau élevé des contraintes), expérience hectométrique

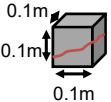


U3a géothermie 2018/19

94

PERSPECTIVES : DÉVELOPPER DES PROJETS PROFONDS À ÉCHELLE RÉELLE

Expérience en lab

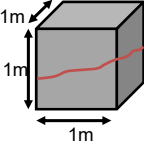


0.1m
0.1m
0.1m

Tests en laboratoire sur des roches intactes et des fractures

- Propriétés THM
- Micro-séismicité
- Friction / dilatance
- ...

Test de cisaillement

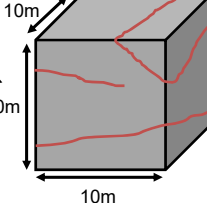


1m
1m
1m

Tests de cisaillement in-situ

- Rupture et endommagement
- Friction / dilatance
- Micro-séismicité
- ...

Expérience au Grimsel

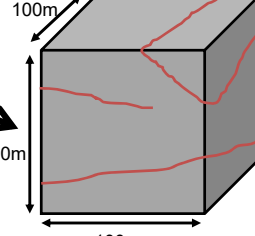


10m
10m
10m

Expériences de stimulation et de circulation

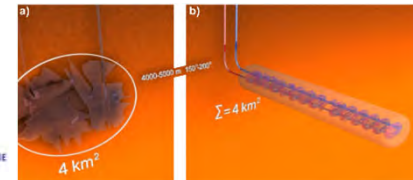
- Mécanismes de création de perméabilité
- Micro-séismicité
- Effets thermo-hydro-mécanique

Exp. grande échelle



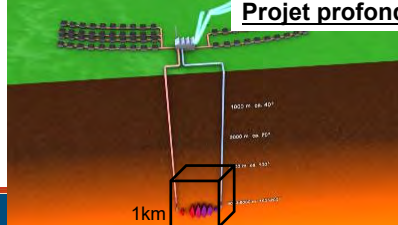
100m
100m
100m

Projet en développement en France, Allemagne, US, ... Haute-Sorne ?



4 km²
Σ = 4 km²

Projet profond

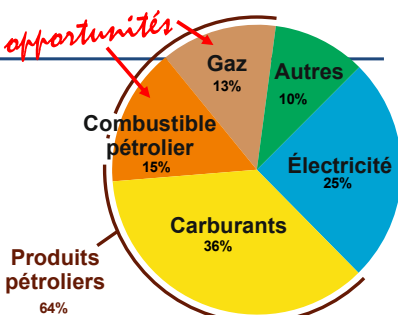


1km

U3a géothermie 2018/19

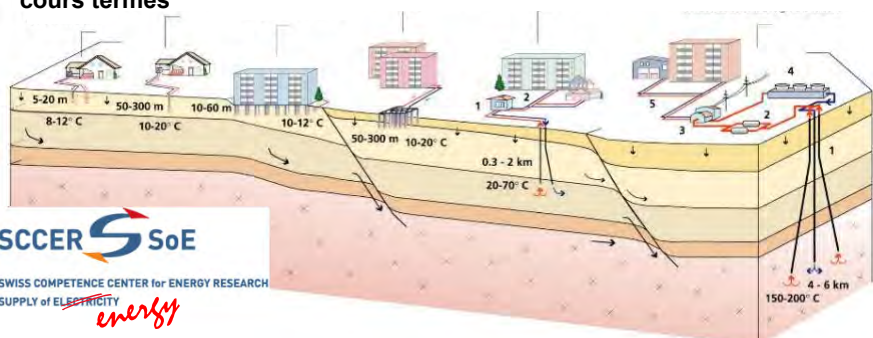
PERSPECTIVES

- La production électrique en contexte géothermique «normal» reste un grand défi.
- De nombreux projets de R&D sont en cours et laisse espérer une percée dans les 5-10 ans à venir,
- **La géothermie pour la chaleur présente par contre de fortes opportunités et des objectifs accessibles à relativement cours termes**




opportunités

Produits pétroliers 64%



5-20 m 8-12° C
50-300 m 10-20° C
10-60 m 10-12° C
50-300 m 10-20° C
0.3 - 2 km 20-70° C
4 - 6 km 150-200° C



SCCER SoE
SWISS COMPETENCE CENTER FOR ENERGY RESEARCH
SUPPLY OF ELECTRICITY
energy

PERSPECTIVES : EXPLORATION ET DÉVELOPPEMENT DE PROJET POUR LA CHALEUR

Genève

Forage de Satigny:
50 l/s (artésien)
33° C

+ ...

- Géothermie moyenne profondeur à Lausanne
- Projet AGEPP (Lavey)
- Projet Energieô (La Côte, Vinzel)
- Exploration à Fribourg

AGEPP: électricité et chaleur avec un forage à 3 km

U3a géothermie 2018/19 97

PERSPECTIVES:

Nécessités:

- 1) Mieux connaître notre sous-sol
- 2) Se préparer à la gestion du sous-sol.

CHAOS EN SOUS-SOL
— DES FAITS PLUTÔT QUE DES MYTHES.

ALPHAN & ASSOCIÉS
GEOTHERMIE

1	Fracturation hydraulique	A	Solde
2	Géothermie profonde	B	Permian-carbonifère
3	Forage d'hydrocarbures	C	Trias
4	Dépôts en couches géologiques profondes	D	Éboulement de sel
5	Site contaminé	E	Lias
6	Utilisation thermique de l'eau souterraine	F	Bajocien/Malm
7	Extraction de sel	G	Molasse
8	Captage de l'eau potable souterraine	H	Dépôt quaternaire
9	Géothermie semi-profonde		
10	Géothermie de surface		

Le profil est purement illustratif et ne reflète pas un contexte géologique réel.

U3a géothermie 2018/19

MERCI !



La géothermie ... un travail d'équipe !

unine **ETH zürich**
UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

DUG-lab team : Valentin Gischig, Joseph Doetsch, Florian Amann, Reza Jalali, Hannes Krietsch, Linus Villiger, Keith Evans, Benoît Valley, Nathan Dutler, Bernard Brixel, Maria Klepikova, Anniina Kittilä, Stefan Wiemer, Martin O. Saar, Simon Loew, Thomas Driesner, Hansruedi Maurer, Domenico Giardini

SCCER SoE
SWISS COMPETENCE CENTER FOR ENERGY RESEARCH
SUPPLY OF ELECTRICITY