

GEOOTHERMIE HAUTE ENERGIE ET TECTONIQUE DES PLAQUES



La Géothermie est une énergie naturelle renouvelable (*à son rythme*)

PLAN

➤ Généralités et définitions

- Géothermie, flux géothermique et gradient
- Types d'exploitations géothermiques
- Géothermie haute énergie et électricité

➤ Exploitation géothermique liée à la tectonique des plaques

- Localisation
- Exemples dans le monde
 - Zones de subduction et Arcs volcaniques
 - Rifts
 - Rides et Hot Spots

➤ ~~Exploitation géothermique en France non liée à la tectonique des plaques~~

➤ Importance et considérations économiques

➤ Conclusions

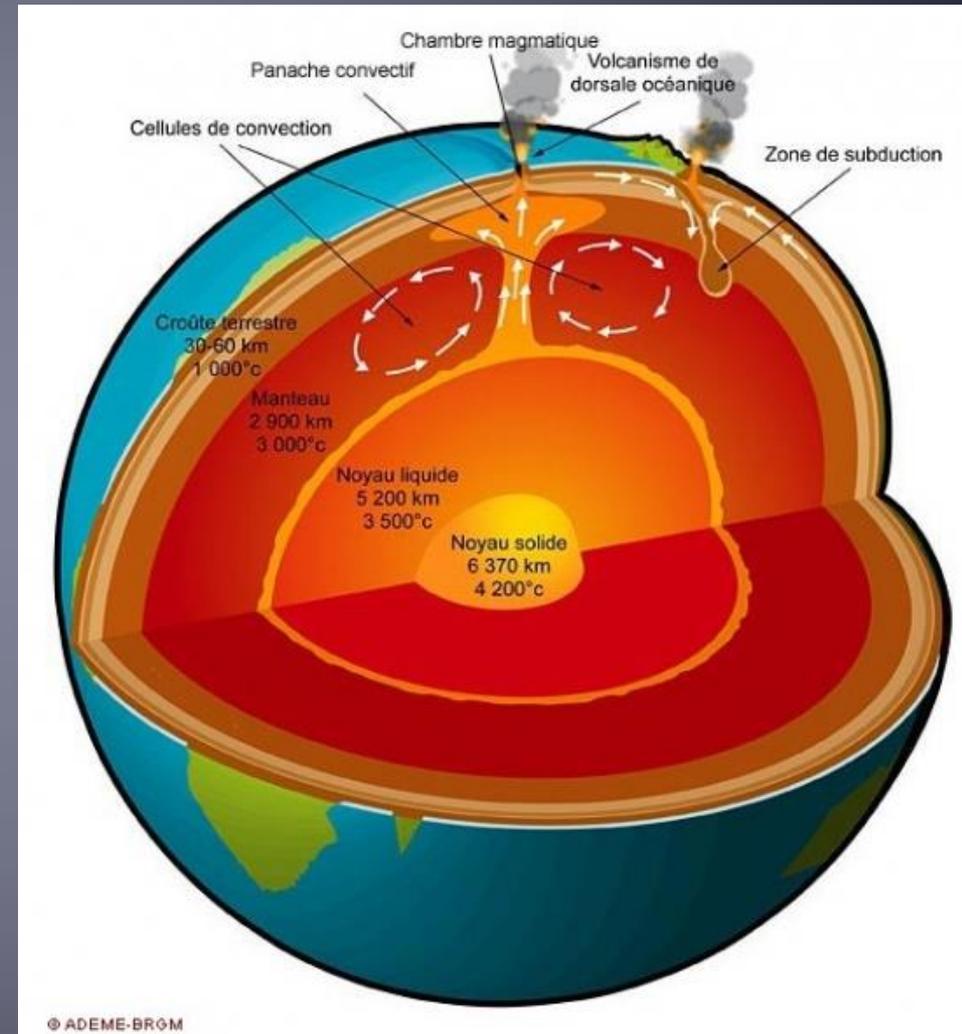
Ca
vA
Chauf
fer!

Qu'est ce que la géothermie ?

- 1) Chaleur générée par le globe terrestre
- 2) Exploitation de cette chaleur comme source d'énergie

- **Les sources de la chaleur terrestre**

- 10 – 25% : résidu de la chaleur de formation initiale depuis ~4,5 milliards d'années et provenant essentiellement du noyau et du manteau
- 75 - 90% : produit de désintégration des éléments radioactifs présents dans le manteau et la croûte terrestre (U, Th, K,...)



Le Gradient Géothermique

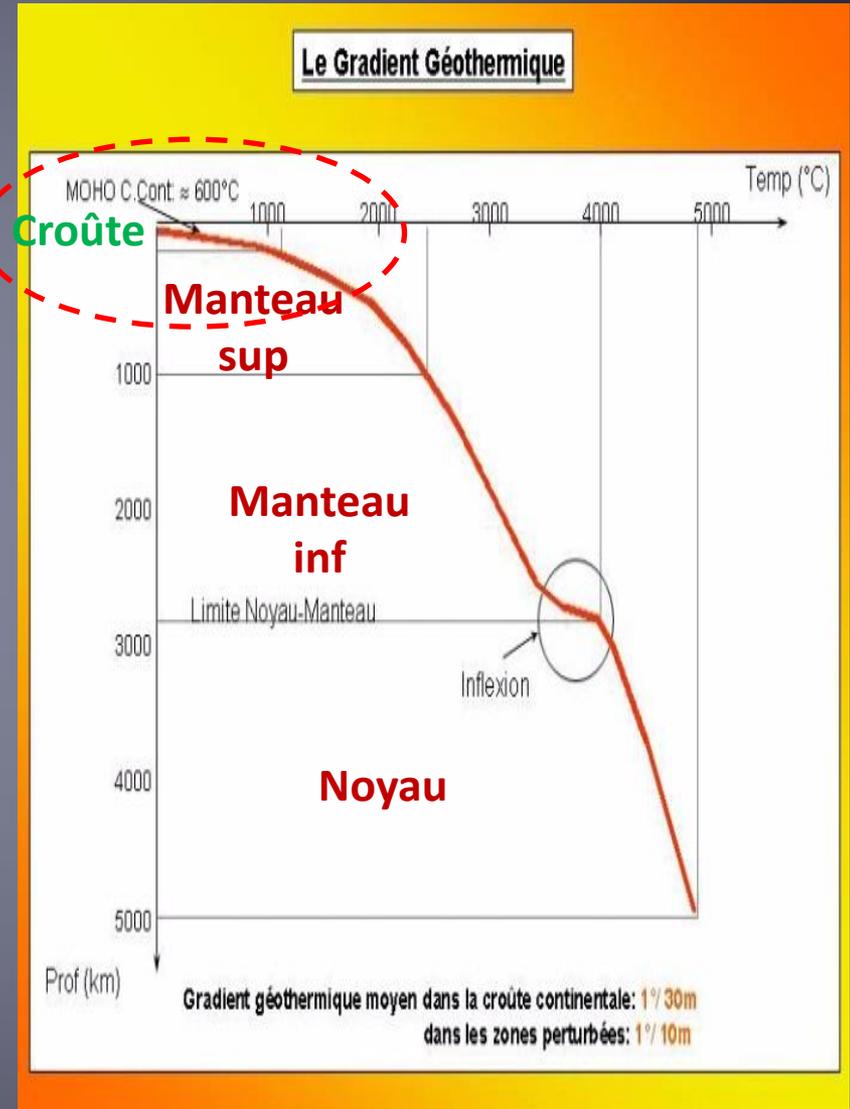
La température augmente avec la profondeur

- en moyenne 3,3 °C/100m dans la partie supérieure de la lithosphère
- 20 à 30 °C / 100m zones chaudes
- en France de 2°C/100m au pied des Pyrénées à 10° C/100m en Alsace
- La température atteint ~600 à 1000°C à la base de la croûte continentale
- En dessous de la croûte, dans le manteau le gradient devient plus faible et la température atteint 4200°C au niveau du noyau

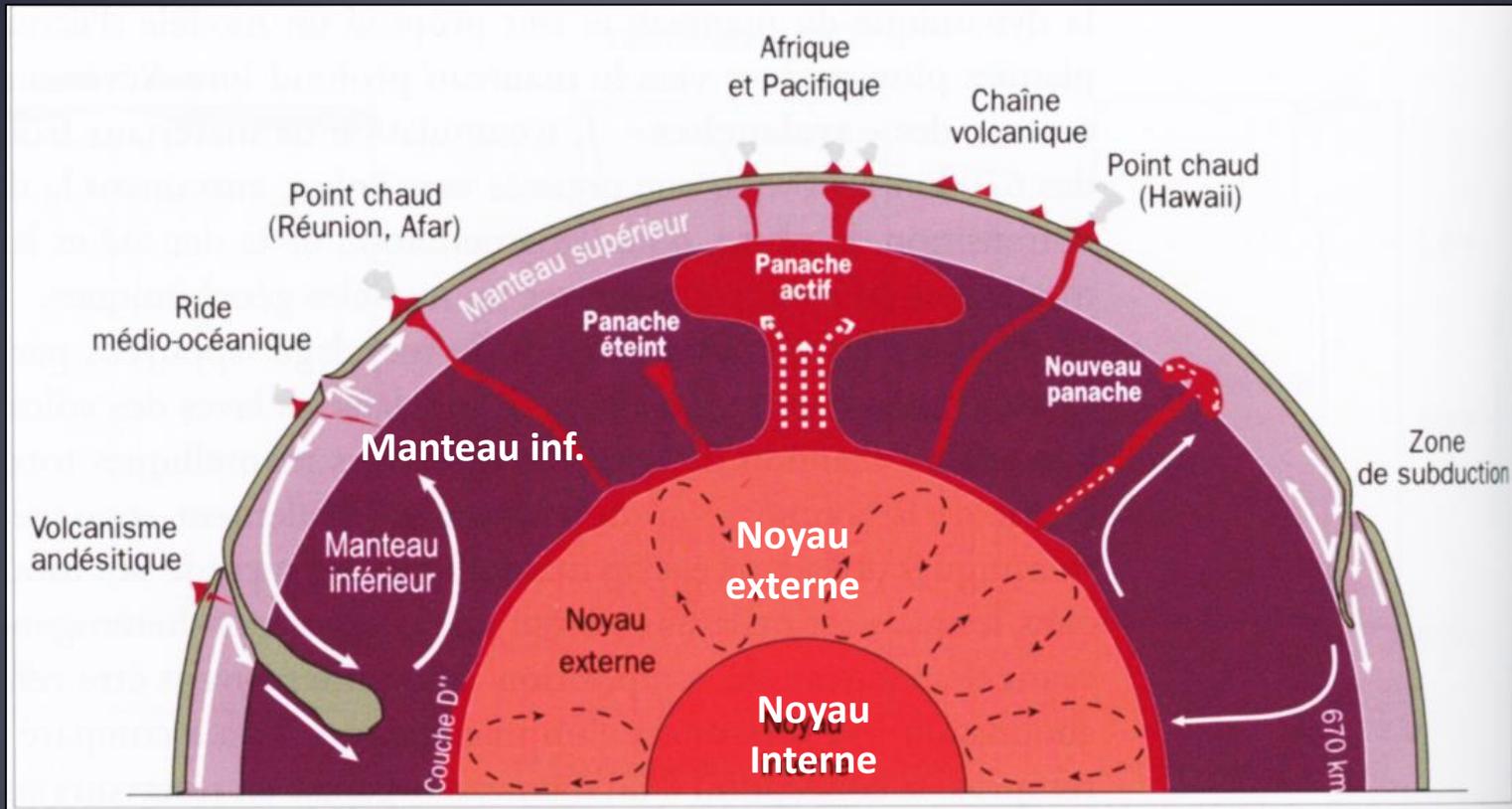
***! Température en profondeur (T) $T = T_{\text{surface}} + \Delta\Gamma * P$**

$\Delta\Gamma$ gradient de température

P profondeur



LA TERRE EN COUPE



Manteau:

- relativement plastique du fait de sa température avec des mouvements de convection compliqués par des mouvements ascendants de matériel chaud en provenance du noyau
- localement chambres magmatiques et matériel en fusion

Croûte:

- relativement rigide avec des déplacements liés à la convection thermique du manteau et aux tensions sur ses surfaces

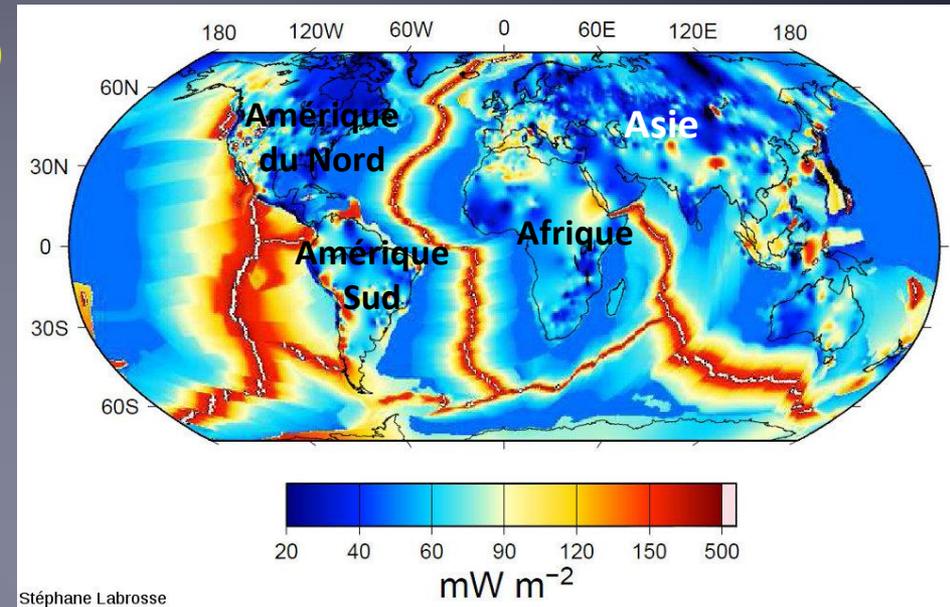
Chaleur terrestre et Flux thermique

Flux thermique: $q = q^* + \Delta A$ (milli watt par m^2/mWm^{-2})

q^* chaleur originaire du manteau où de la croûte inférieure

ΔA chaleur générée par la radioactivité de la croûte supérieure

- zones continentales anciennes 40 à 60 mWm^{-2}
- zones océaniques récentes > 250 mWm^{-2}

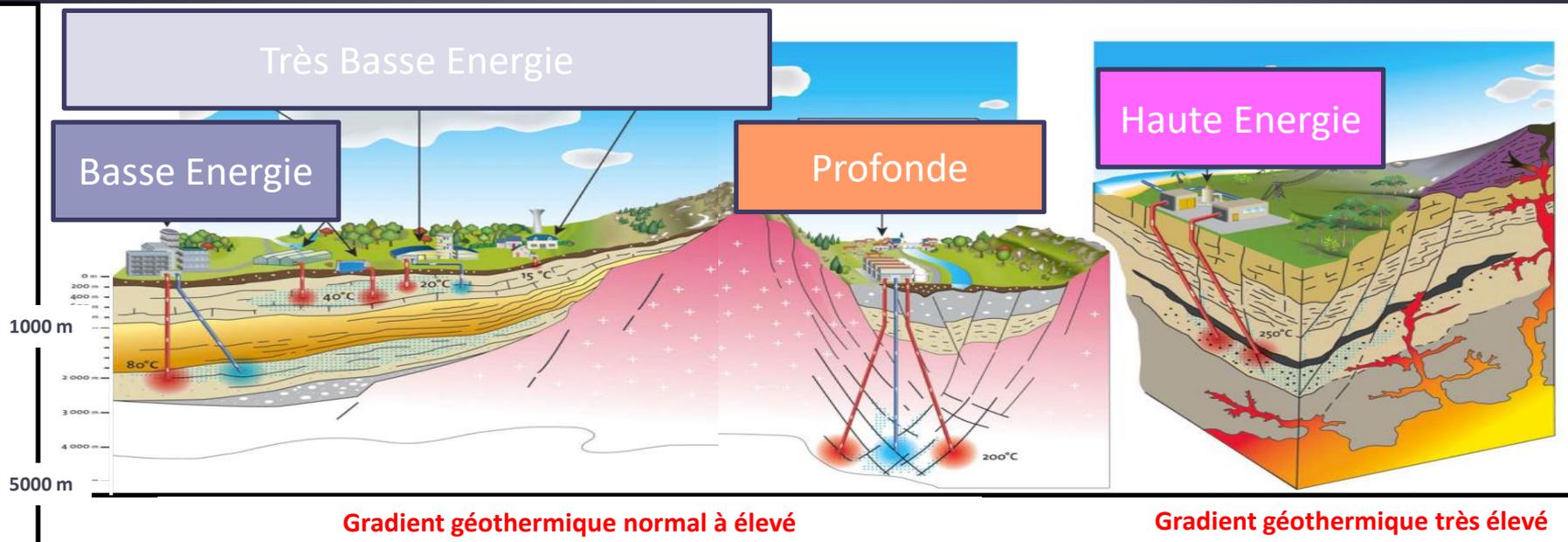


(milliwatt par mètre carré)

Le flux thermique n'est pas uniforme

- Le flux thermique varie en fonction de la manière dont la chaleur est transmise et distribuée : **conductivité** des roches et des mouvements de **convection**
 - La **conductivité thermique** est une propriété physique des roches. La transmission de la chaleur se fait par vibration de matière. Pour les roches elle est lente et faible > (lithosphère)
 - La **convection** est un mouvement de matière généré par des différences de température et donc de gravité. La transmission de la chaleur par convection est plus rapide et forte > (manteau)

Les 4 Types d'Exploitation Géothermique



- Géothermie de très basse énergie < 40°C
- Géothermie de basse énergie 40 à 90 °C
- Géothermie profonde (>4000 m) ~200°C
- Géothermie haute énergie 150 à 250°C

Chauffage

Surface, Bassins sédimentaires

Cogénération (électricité + chauffage)

Electricité

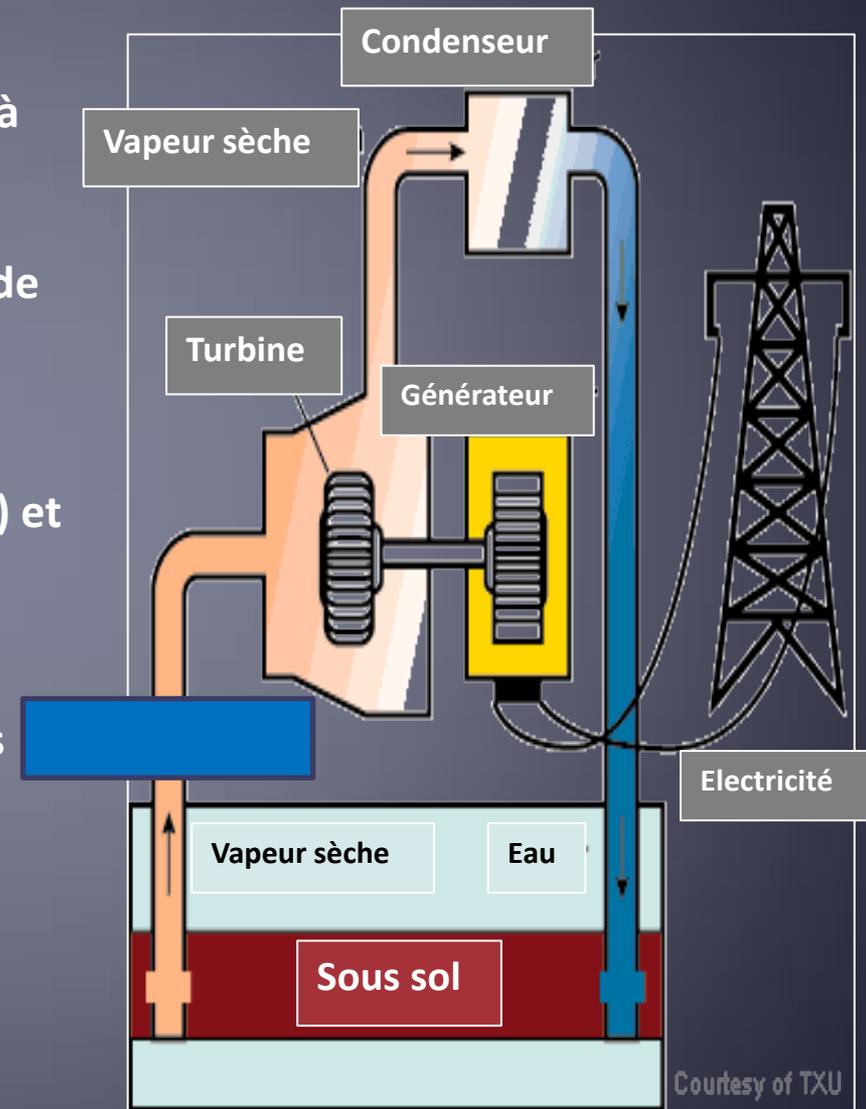
Proximité de Magma



Géothermie Haute Energie et Production électrique

Seule la **Géothermie Haute Energie** est adaptée à la production **d'électricité**:

- Nécessité de faire tourner des turbines avec de la vapeur pour entraîner des alternateurs
- $T > 150\text{ °C}$: suffisamment de vapeur (sèche) et de pression
- T de 100 °C et 150 °C : possible mais technologies spéciales d'échange avec fluides (cycle binaire) à taux d'ébullition bas ou de vaporisation faible pression (flash steam)



Courtesy of TXU

Flux et gradient géothermique utiles

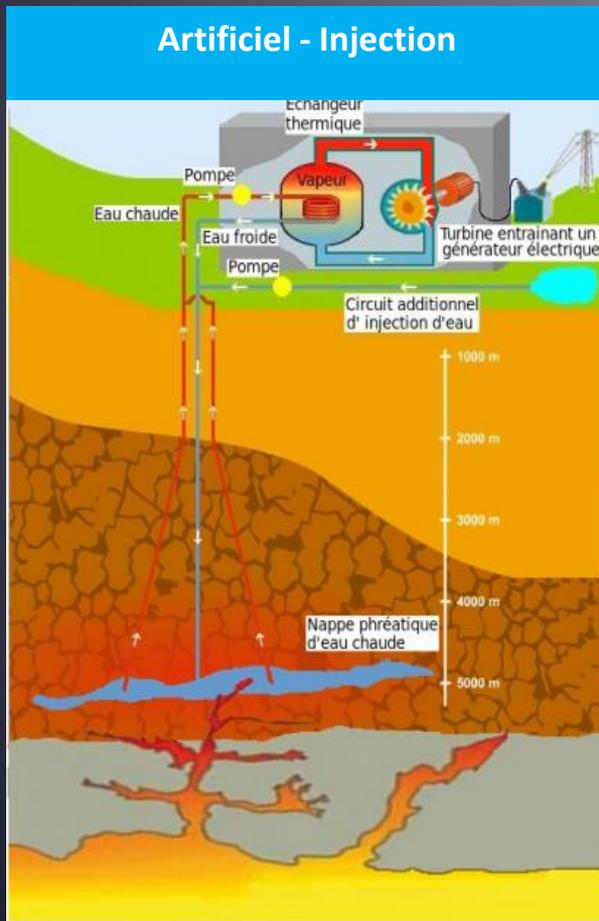
Flux et gradient thermique normal

- vers 3 km partie supérieure de la croûte : 90 à 100°C
 - exploitable par forage « standard » et suffisant pour chauffage
- vers 5 à 7 km : 130 à 150°C
 - minimum pour générer de la vapeur mais trop profond pour exploiter sans investissement lourd
- Pour générer économiquement la vapeur nécessaire à entraîner des turbines électriques il faut :
 - flux thermique anormal
 - donc magmatisme, volcanisme
 - donc tectonique des plaques

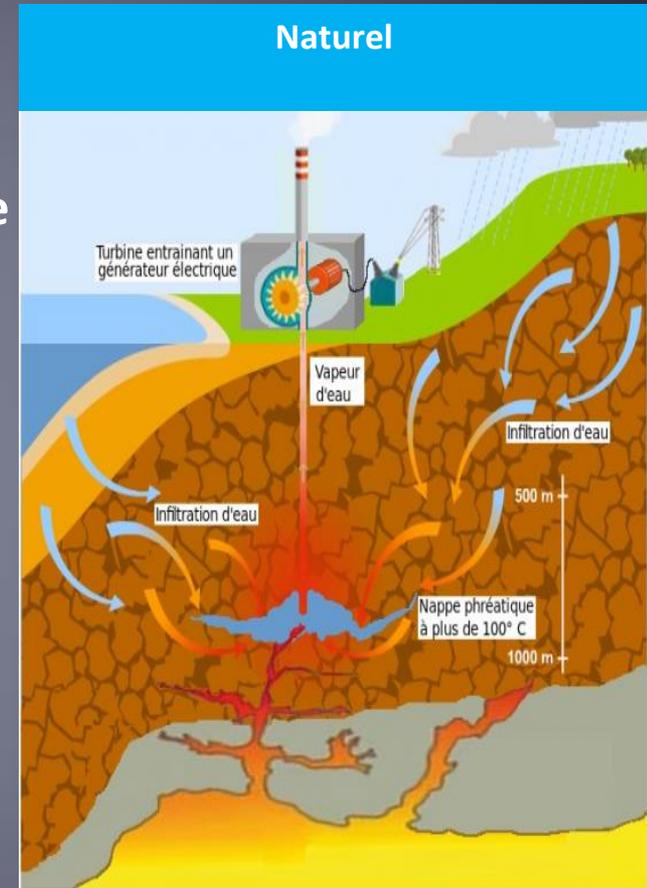
Production électrique à partir de la Géothermie haute énergie

Pour exploiter l'énergie il faut un fluide transporteur : eau sous forme liquide ou vapeur.

Deux systèmes:



➤ système hydrométrique naturel circulant dans les zones chaudes et se transformant en vapeur

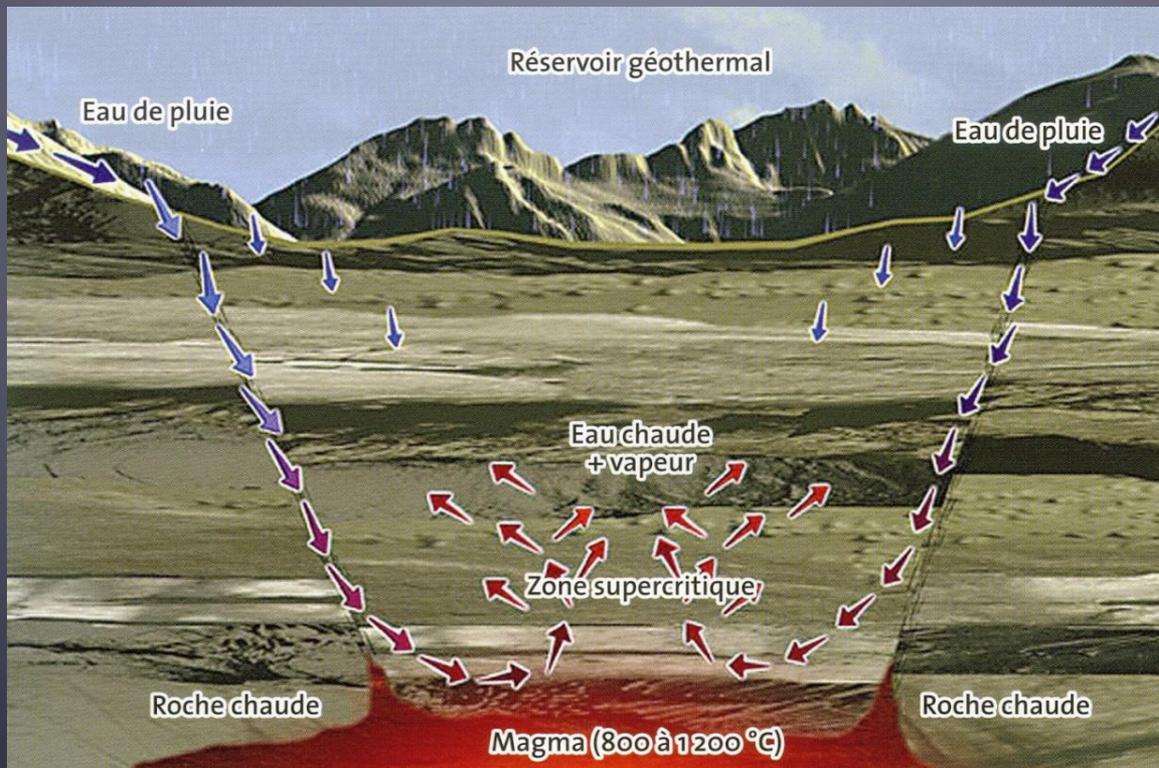


➤ injection artificielle d'eau et récupération de vapeur

Géothermie Haute Energie – Le système naturel

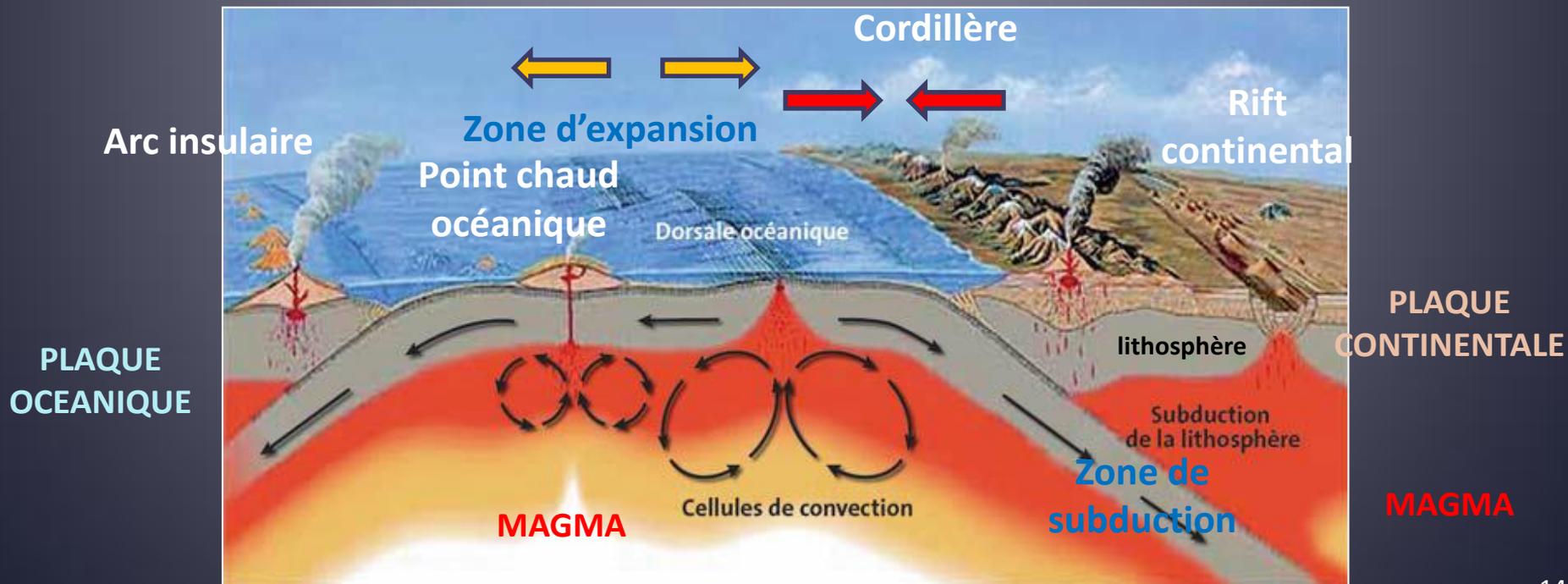
Trois éléments

- Un **magma** ou une chambre magmatique à haute température peu profond (<5000 m) réchauffant les roches avoisinantes
- Un **système hydraulique** naturel alimenté (concentration des pluies)
- Des **réservoirs, failles ou conduites** permettant la concentration et la circulation de l'aquifère

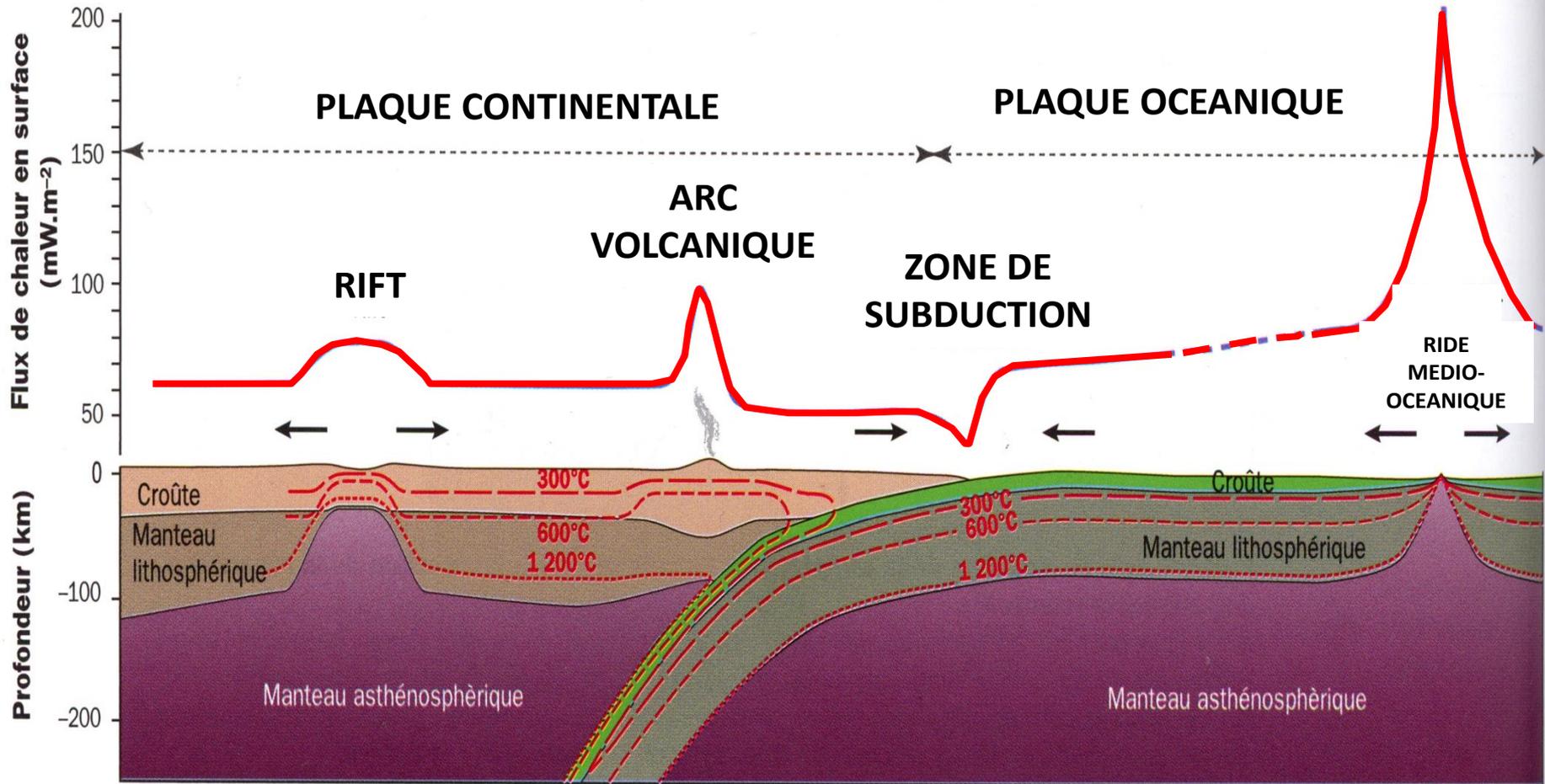


ZONES CHAUDES ET TECTONIQUE DES PLAQUES

- Les **plaques continentales** et **océaniques**, partie supérieure de la lithosphère qui repose sur un manteau magmatique
- Le magma remonte : 1) au niveau des océans le long des **rides médio océaniques**, 2) au dessus des **zones de subduction**, 3) dans des **zones en forte extension** de la croûte continentale. C'est un des moteurs du mouvement des plaques
- 4) les **points chauds « hot spots »** sont des points fixes profonds indépendants des plaques qui amènent aussi du magma à proximité de la surface



Distribution du flux géothermique

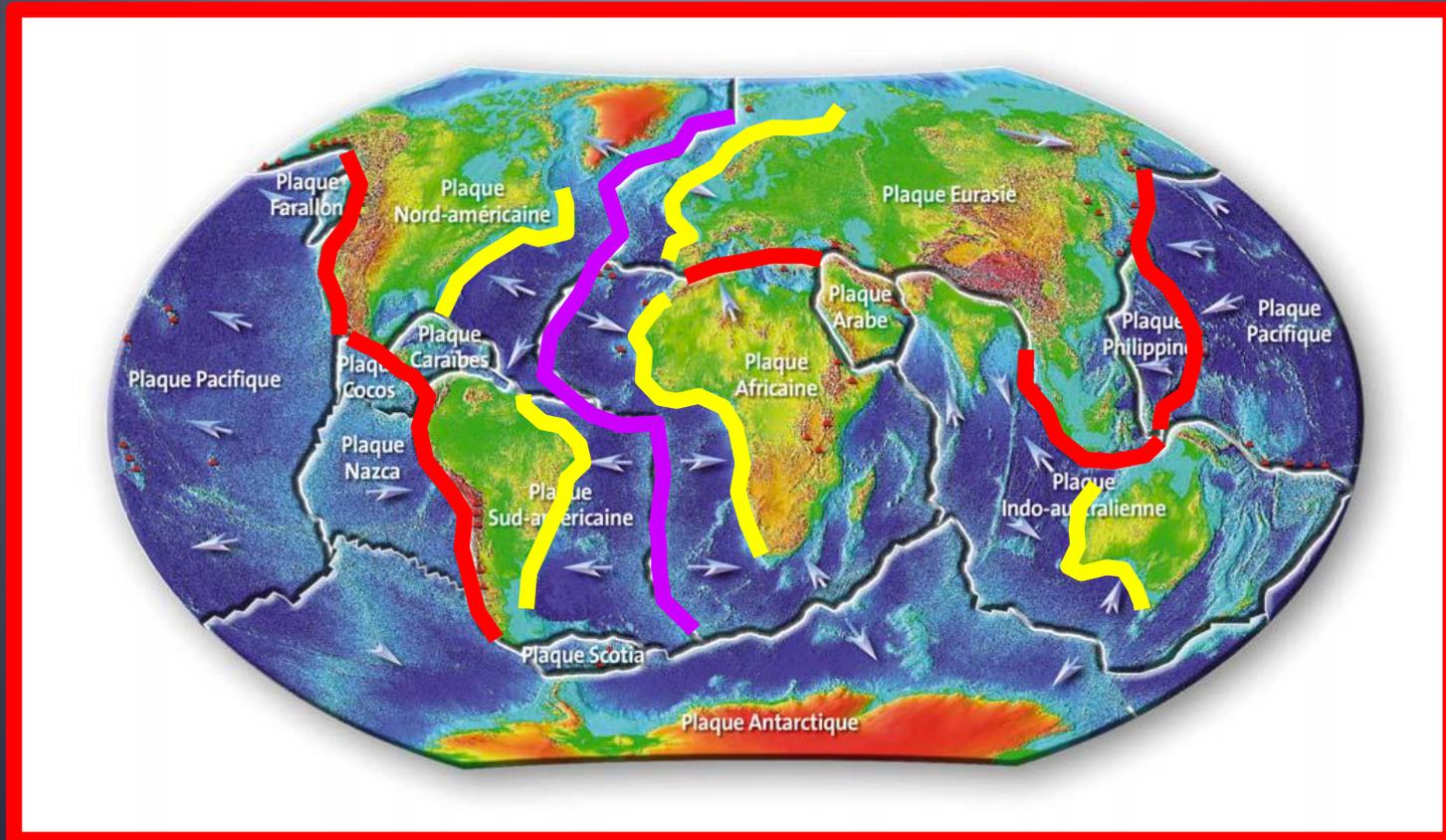


Les Plaques Tectoniques

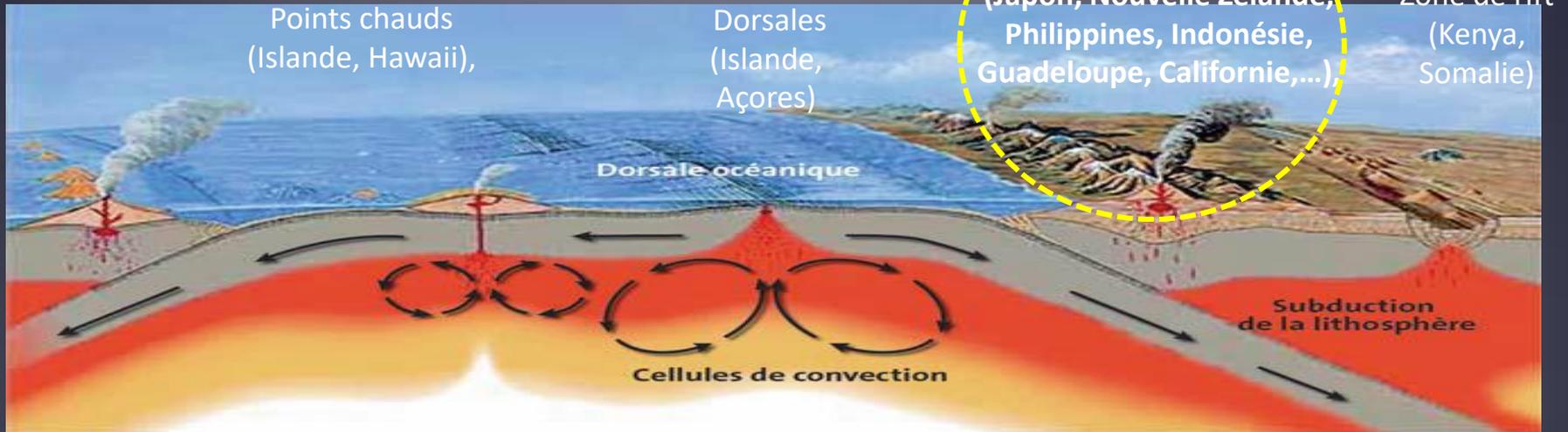
Il existe quinze plaques tectoniques majeures composées soit de croûte océanique uniquement, soit essentiellement de croûte continentale, soit mixtes mais aussi de nombreuses « micro-plaques » (40)

Les bordures des continents (lieux avec population) se divisent en marges **passives** sans grand intérêt géothermique et en marges **actives**.

Les **rides médio océaniques** sont de grand intérêt géothermique mais peu peuplées.



Zones tectoniques à flux géothermique élevé



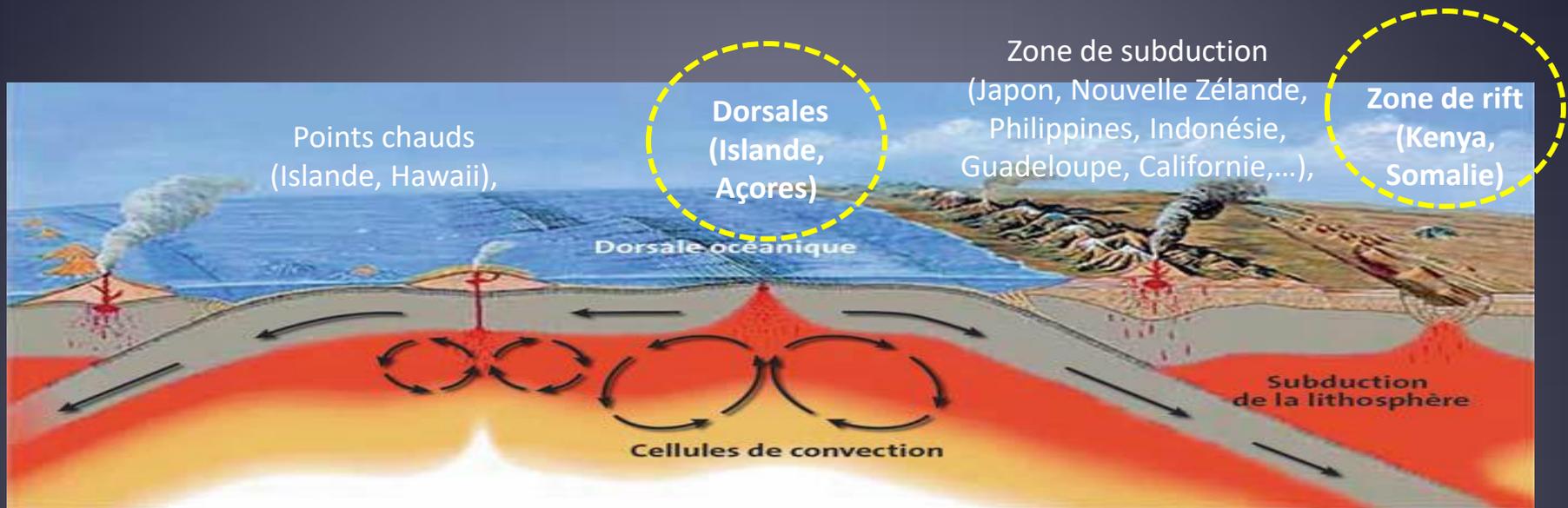
Zones de subduction et arc volcanique:

- La plaque océanique plonge sous la plaque continentale
- Fusion des roches et ligne de volcans parallèlement à la ligne de subduction
- Zone géothermales nombreuses: **Indonésie, Japon, Mexique, Nouvelle Zélande, Philippines, Amérique Centrale**

Zones de subduction et en translation (cisailantes/transformantes)

- Zones où les plaques glissent latéralement l'une contre l'autre
- Création de zones et bassins en extension (pull-apart) avec volcanisme associé et génération de chaleur : **Californie (Salton Trough, Cerro Prieto et Imperial Valley, The Geysers)**

Zones tectoniques à flux géothermique élevé



Zones des rides médio océaniques:

- Zones de formation de croûte océanique et épanchements basaltiques
- Maximum de mouvement de magma et donc d'énergie thermique
- Peu d'endroits favorables à une exploitation économique du fait de l'absence de zones habitées
(Islande, Açores,...)

Zones d'extension « rifting »:

- Zones de forte extension à l'intérieur des blocs continentaux
- Volcanisme récent avec magma proche
- **Rifts Est Africains (Olkaria Kenya) , Rio Grande Rift (Valles Caldera New Mexico U. S)**

Zones tectoniques à flux géothermique élevé

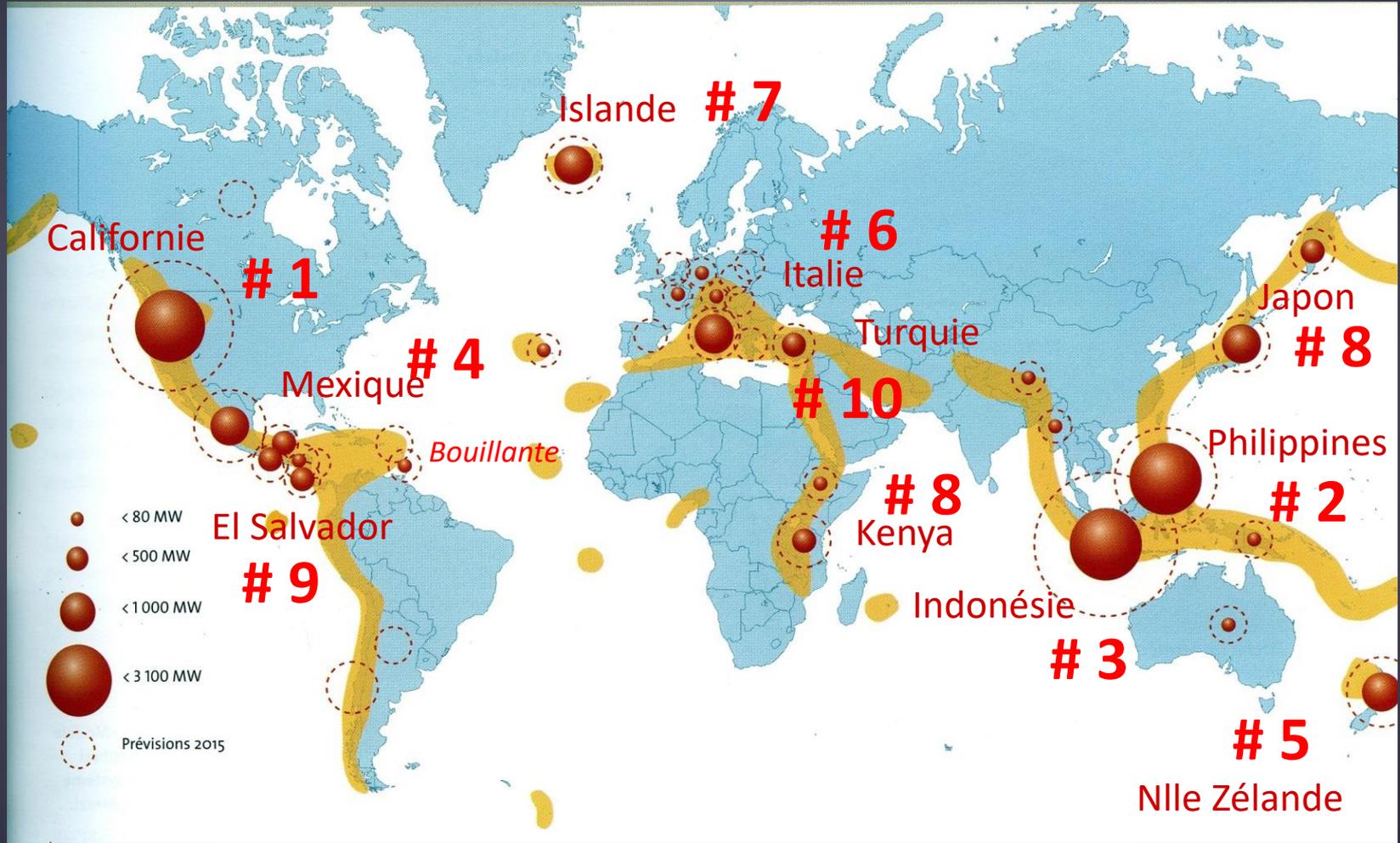


Point chauds "Hot spots »:

- centres volcaniques au dessus de remontées de magma chaud
- à l'intérieur des plaques continentales **Yellowstone**
- dans les plaques océaniques **Hawaii , Islande, Açores , Réunion**

Lieux de production électrique à partir de géothermie

Les dix plus grandes capacités installées



- En France une seule centrale électrique géothermique : Bouillante en Guadeloupe

RELATIVISER LES ECHELLES DE PUISSANCE

- KW = kilowatt = 10^3 w = 1000 watts
- MW = megawatt = 10^6 w = 1 million de watts
- GW = gigawatt = 10^9 w = 1 milliard de watts = 1000 MW

- On a besoin d'environ **12 MW** pour 10000 habitants

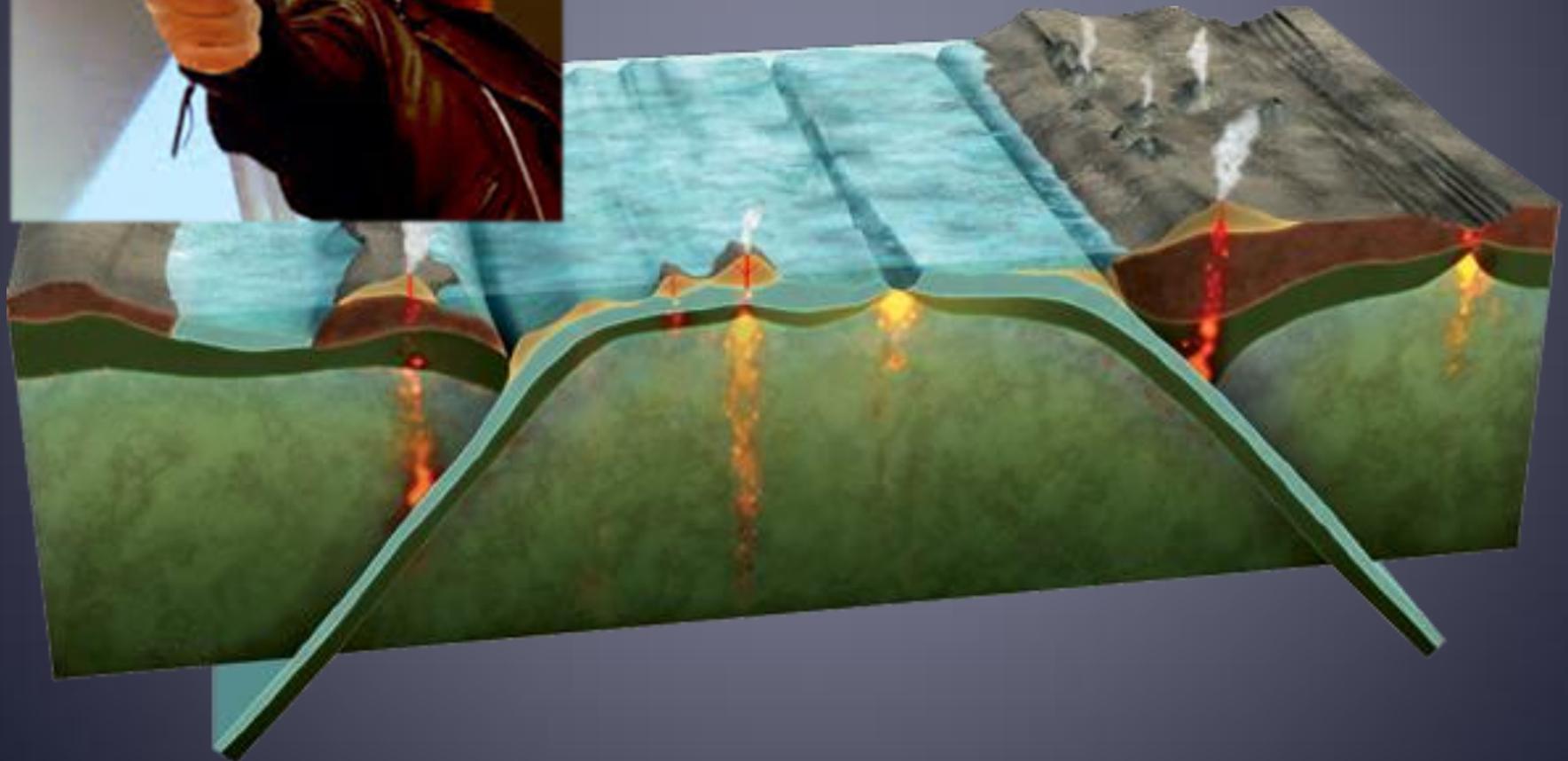
- Une éolienne : 1 à 7 MW par unité

- Un réacteur nucléaire : 500 MW à 1 GW

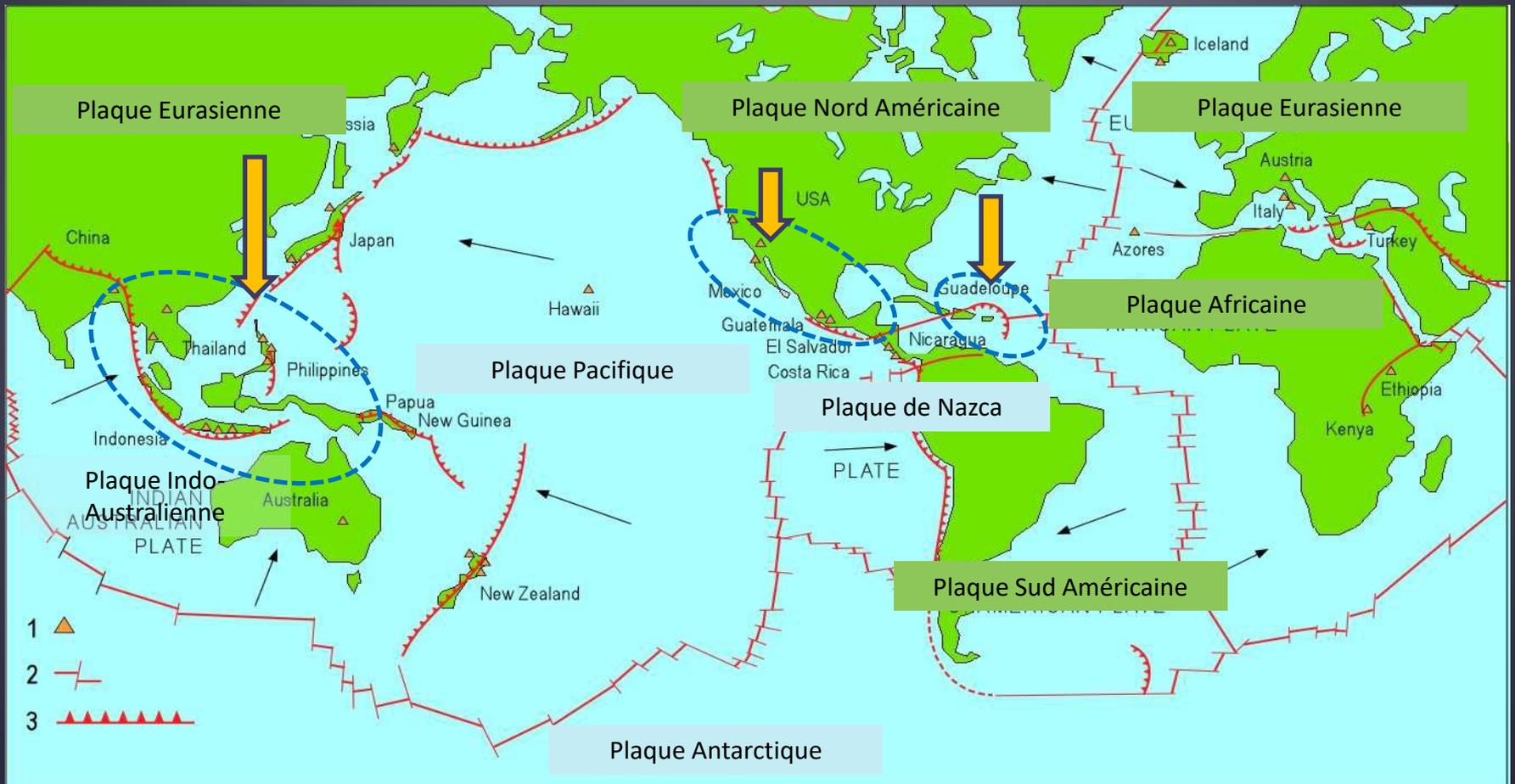
- La France a environ 120 GW installés

LA VERITE VRAIE ? : Confusion possible et entretenue, entre puissance installée, puissance utilisée, énergie réellement délivrée !

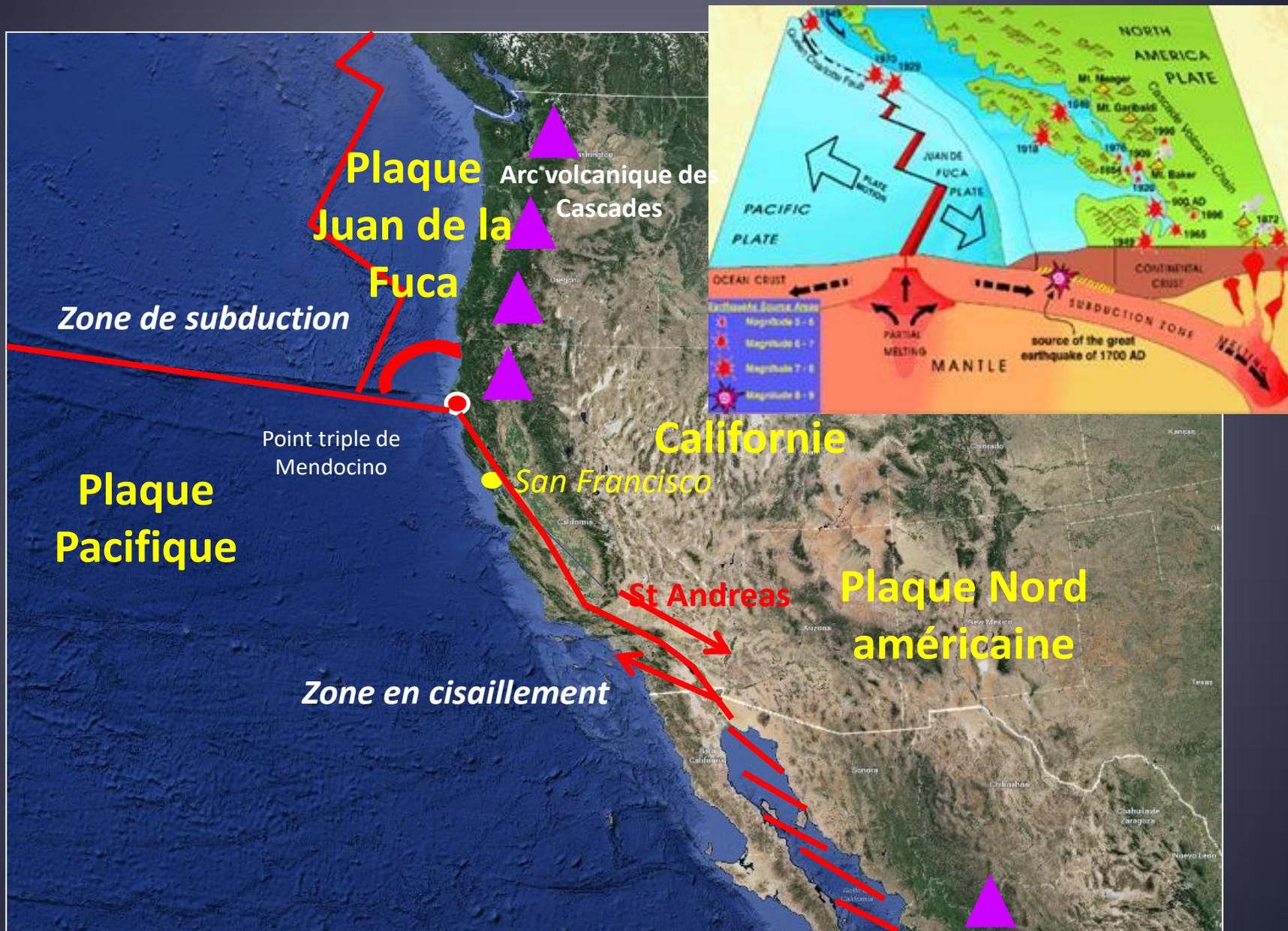
LA OU IL Y A DE LA SUBDUCTION C'EST TOUT BON !



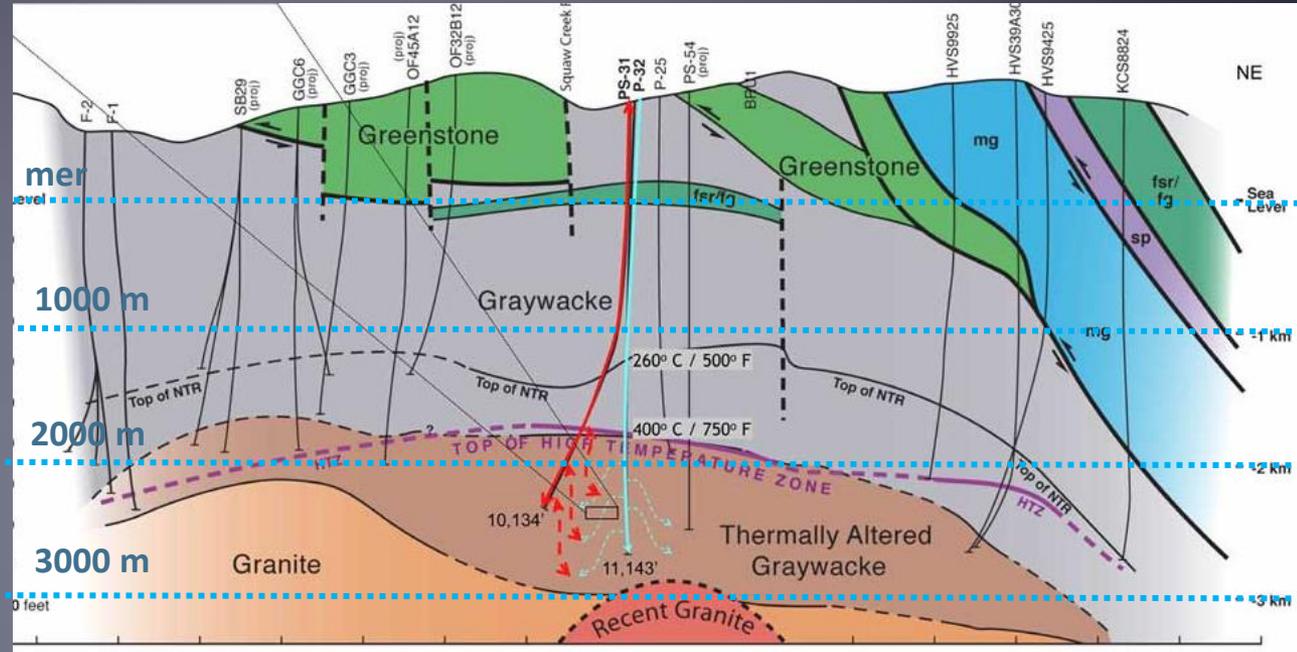
EXEMPLES #1 : Zones de subduction avec volcanisme associé



Subduction/Arcs volcaniques

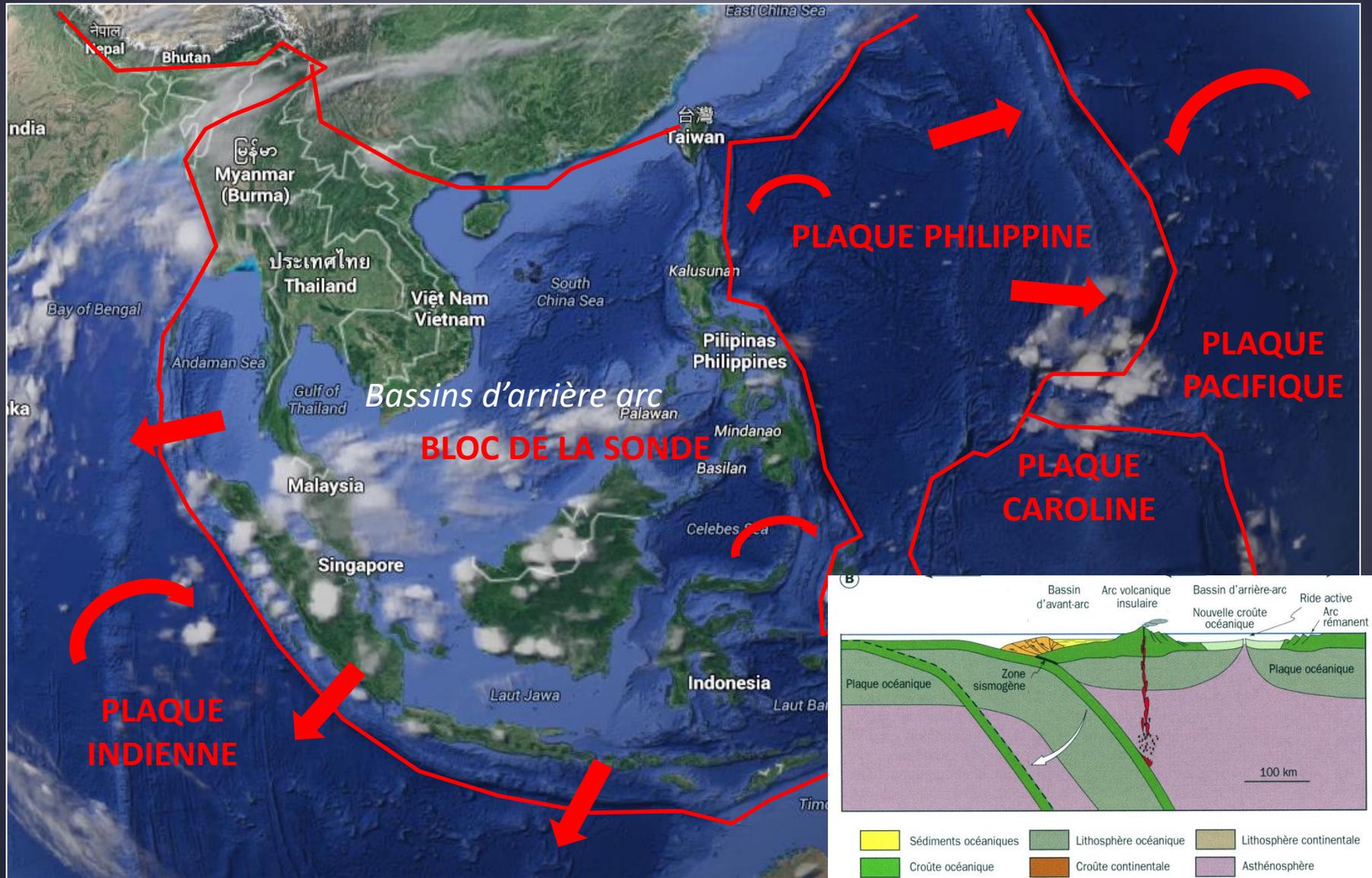


Subduction/Arcs volcaniques Californie – The Geysers

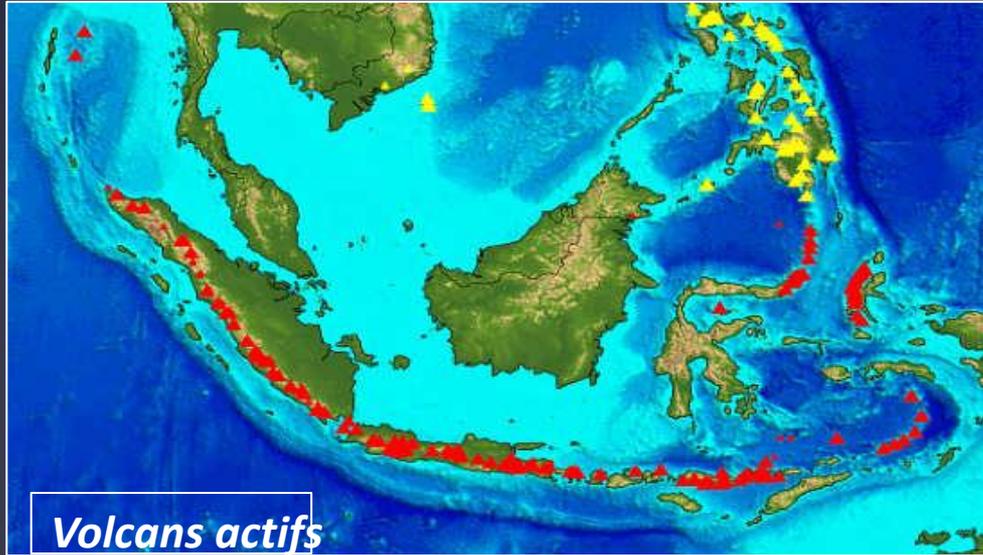


- Nord de San Francisco en Californie
- Plus grand centre de géothermie au monde > 685 MW (1,6 GW installés) - depuis 1962
- 21 centrales - 330 forages producteurs- 60 injecteurs
- 60 % de la demande de la région côtière
- Grande chambre de magma à 7000 m de profondeur, 14 km de diamètre, volcanisme associé à des intrusions granitiques
- Vapeur dans réservoir gréseux (dépôts océaniques profonds). P ~2500 m T 200/300°C
- Vapeur sèche favorable aux turbines des centrales électriques
- Nécessité actuellement d'injecter de l'eau car manque de fluide (+ incendies récents)

Subduction/Arcs volcaniques Indonésie et Philippines

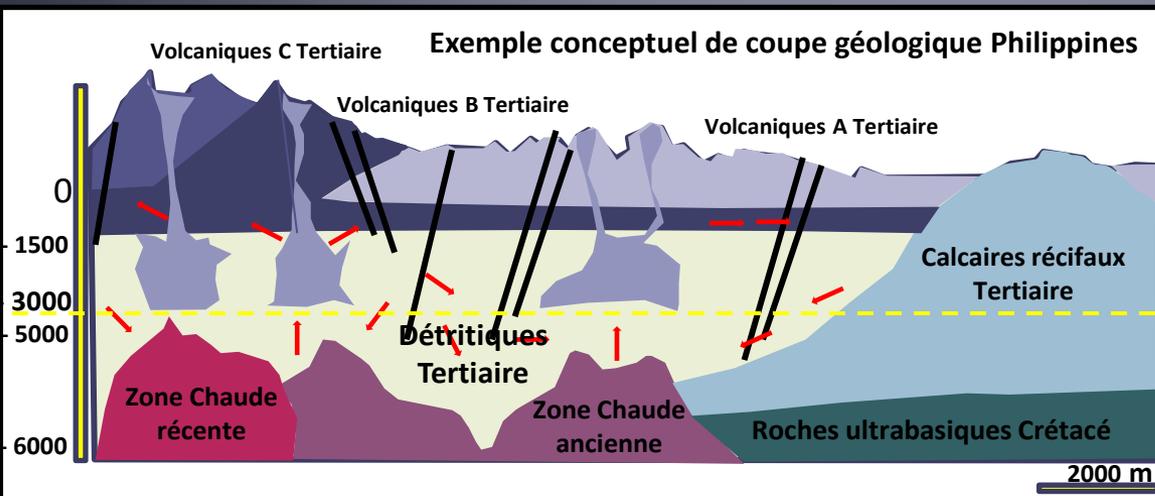


Subduction/Arcs volcaniques Philippines et Indonésie



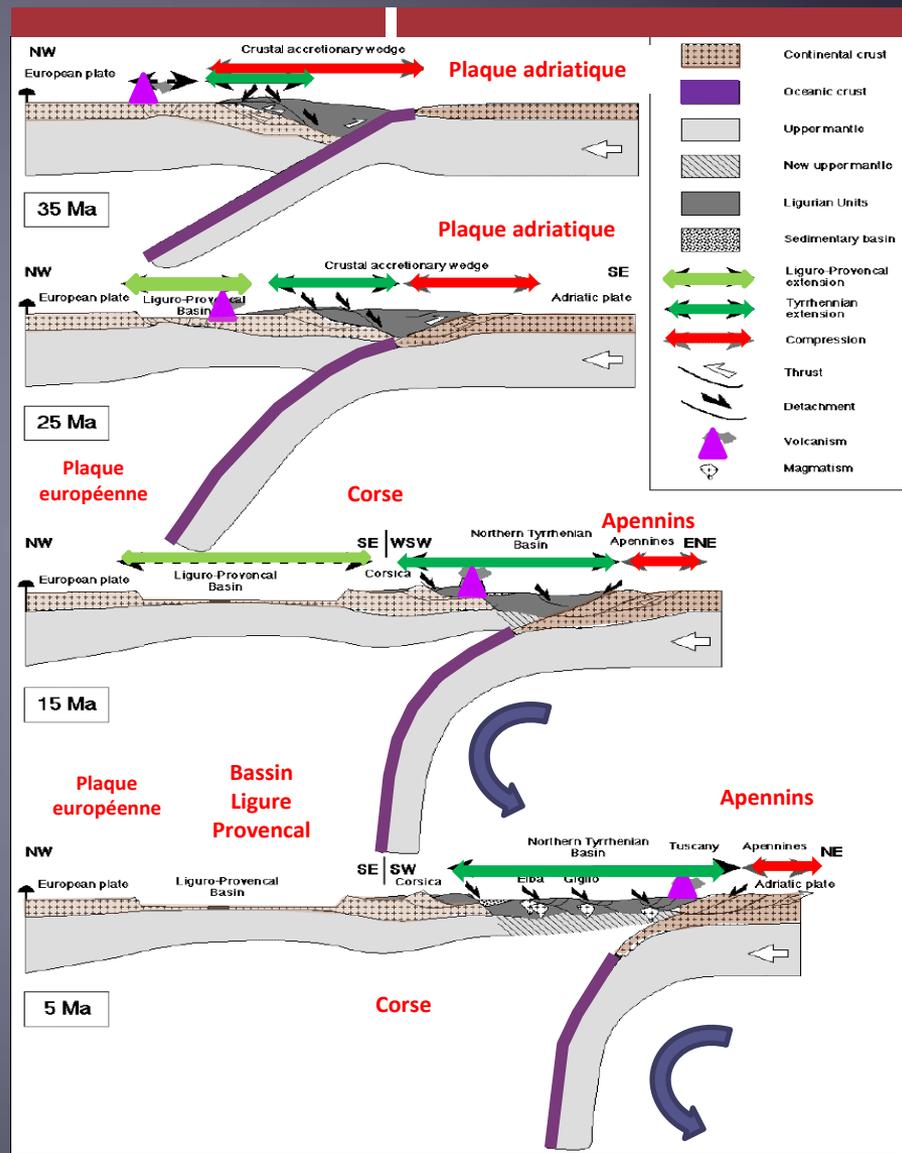
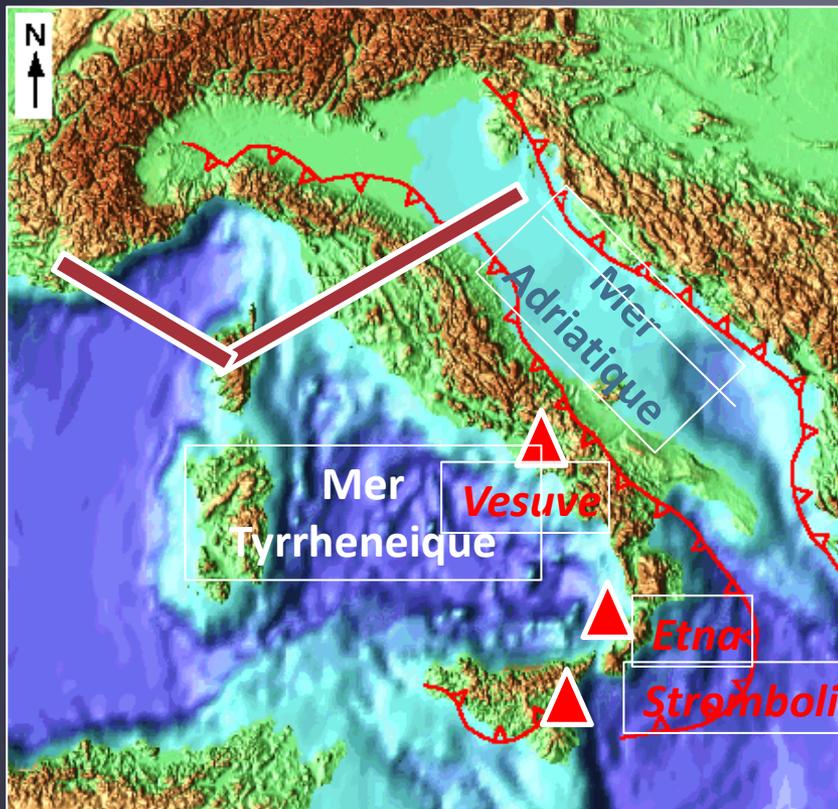
- **Philippines : 1850 MW (#2)**
 - 15% de l'électricité des Philippines
 - 7 centrales dont 3 majeures de 100 à 900 MW (unités de 20 à 60MW)
 - Température 300°C - Prof 1800 à 3000 m
 - Eaux riches en silice et calcium
- **Indonésie : 1300 MW (# 3)**

- 4% de l'électricité
- 9 centrales de 15 MW à 380MW
- 265 zones géothermales mais zones protégées
- Potentiel régional 30 GW



Subduction/volcanisme et extension « slab rollback »

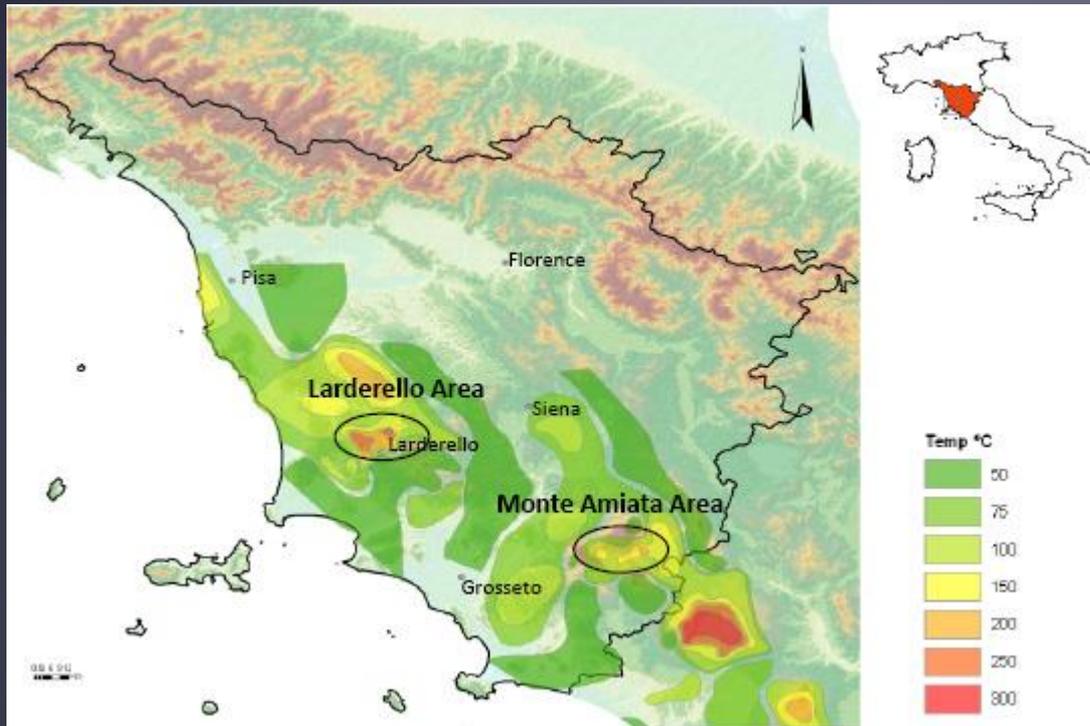
ITALIE



Le volcanisme et le gradient élevé local semblent plutôt dus à un phénomène d'extension tardif, en arrière du front apennin lors d'un phénomène de « roll back de la zone en subduction »

Subduction/volcanisme et extension post orogénique

ITALIE #6

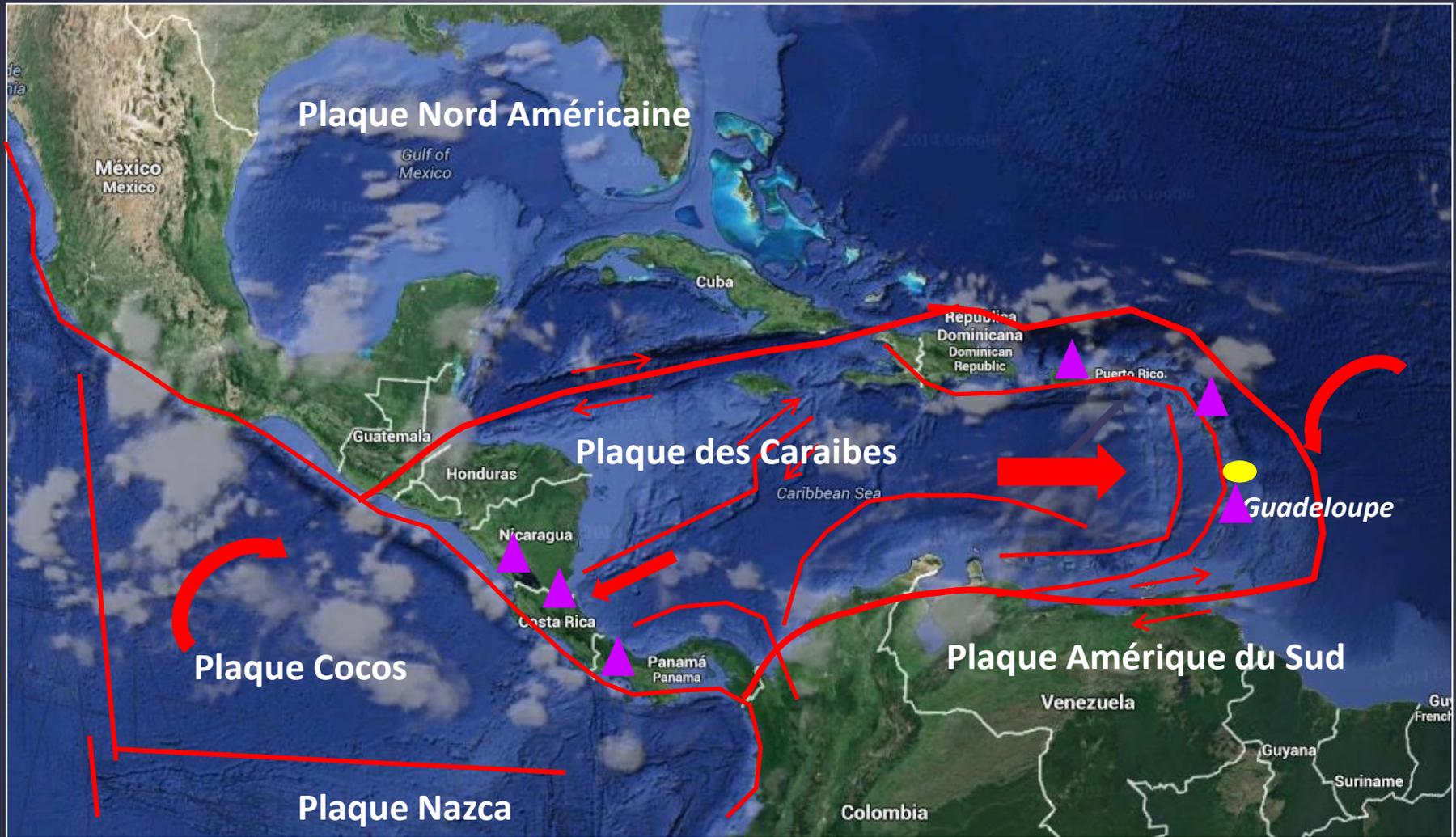


- 900 MW installés
- Larderello depuis 1913
- 32 stations
- 2 réservoirs
 - *carbonate (400/600 m) avec eau à 150 °C*
 - *Roche métamorphique fracturée (3000 m) avec eau à 300°C*
- Nécessité de réinjection d'eau depuis les années 1980



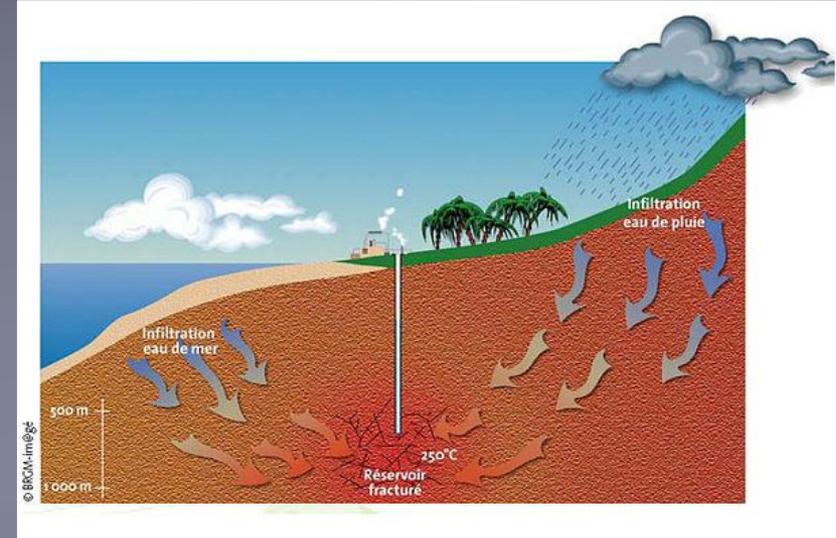
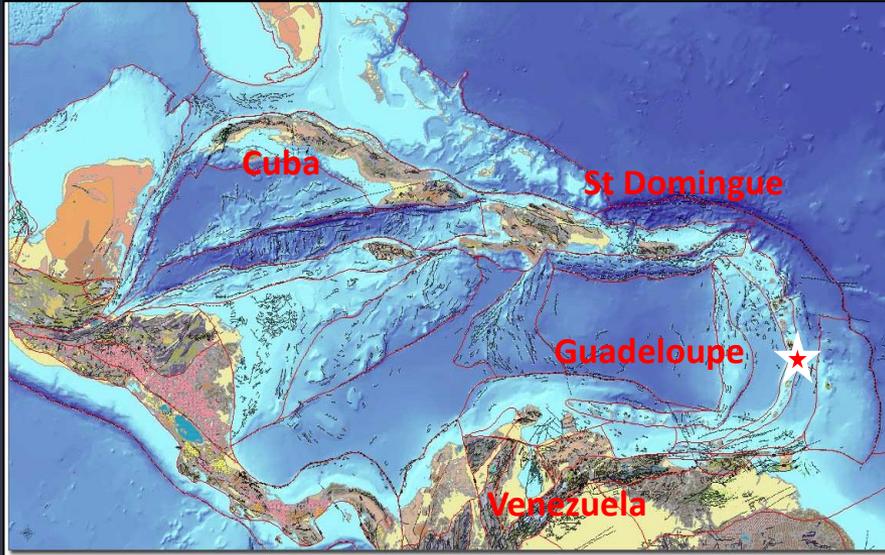
Subduction/Arc volcanique

Caraïbes - Antilles

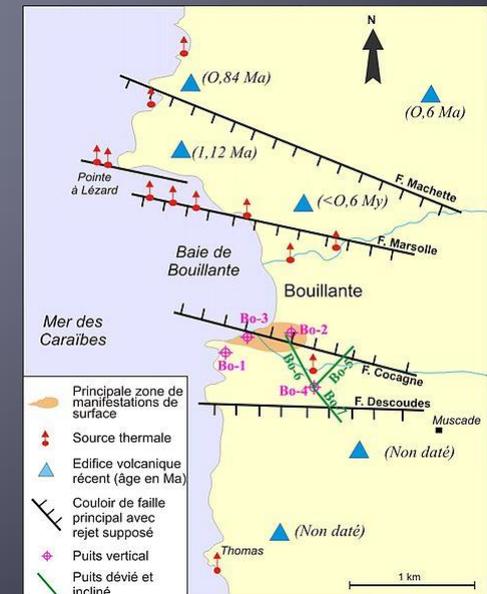


Subduction et Arcs volcaniques

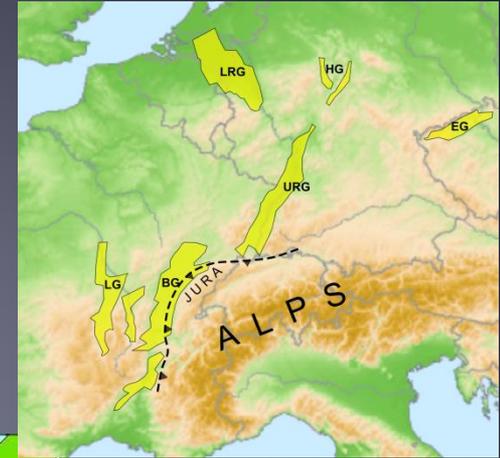
Caraïbes - Bouillante (Guadeloupe)



- 15 Mw - (~ 20 000 foyers) - 6 % des besoins de la Guadeloupe
- Eaux de mer et eaux continentales s'infiltrent et se réchauffent sur une chambre magmatique
- Eau à 250°C à 500m
- 7 forages à ~ 1100 m dont 5 producteurs (3 forages déviés)
- Eau réinjectée
- Quelques problèmes géotechniques d'instabilité du site due à sa localisation sur des zones faillées

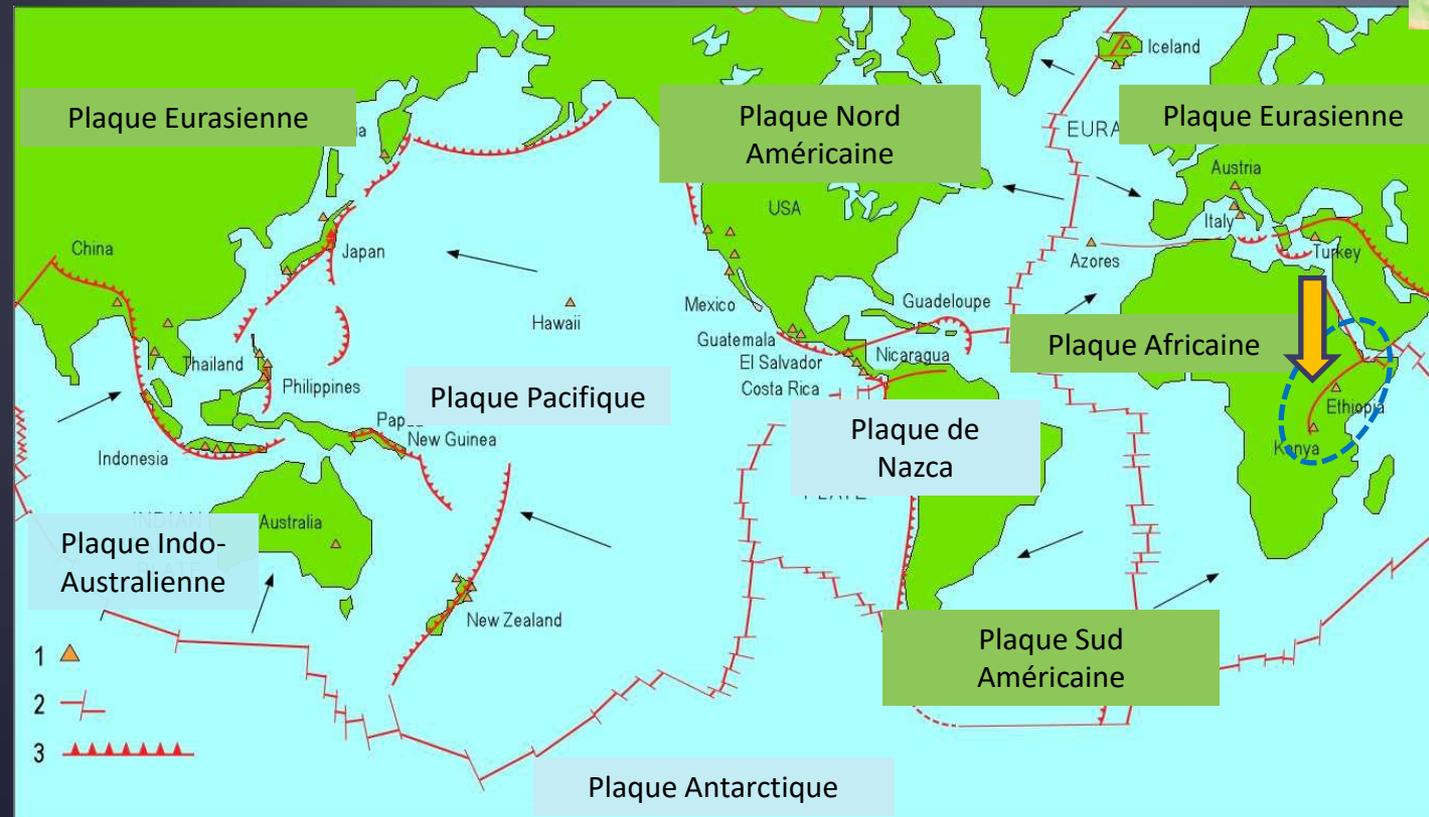


EXEMPLES #2 : Zones de Rift

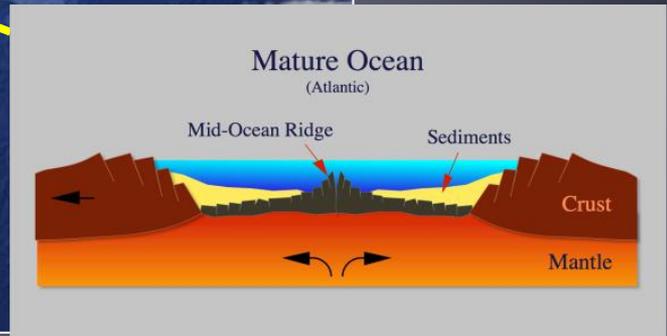
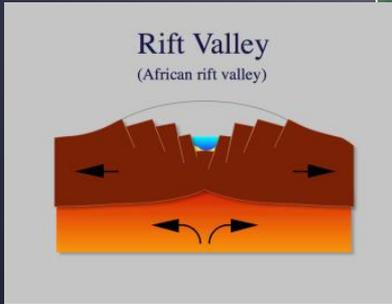
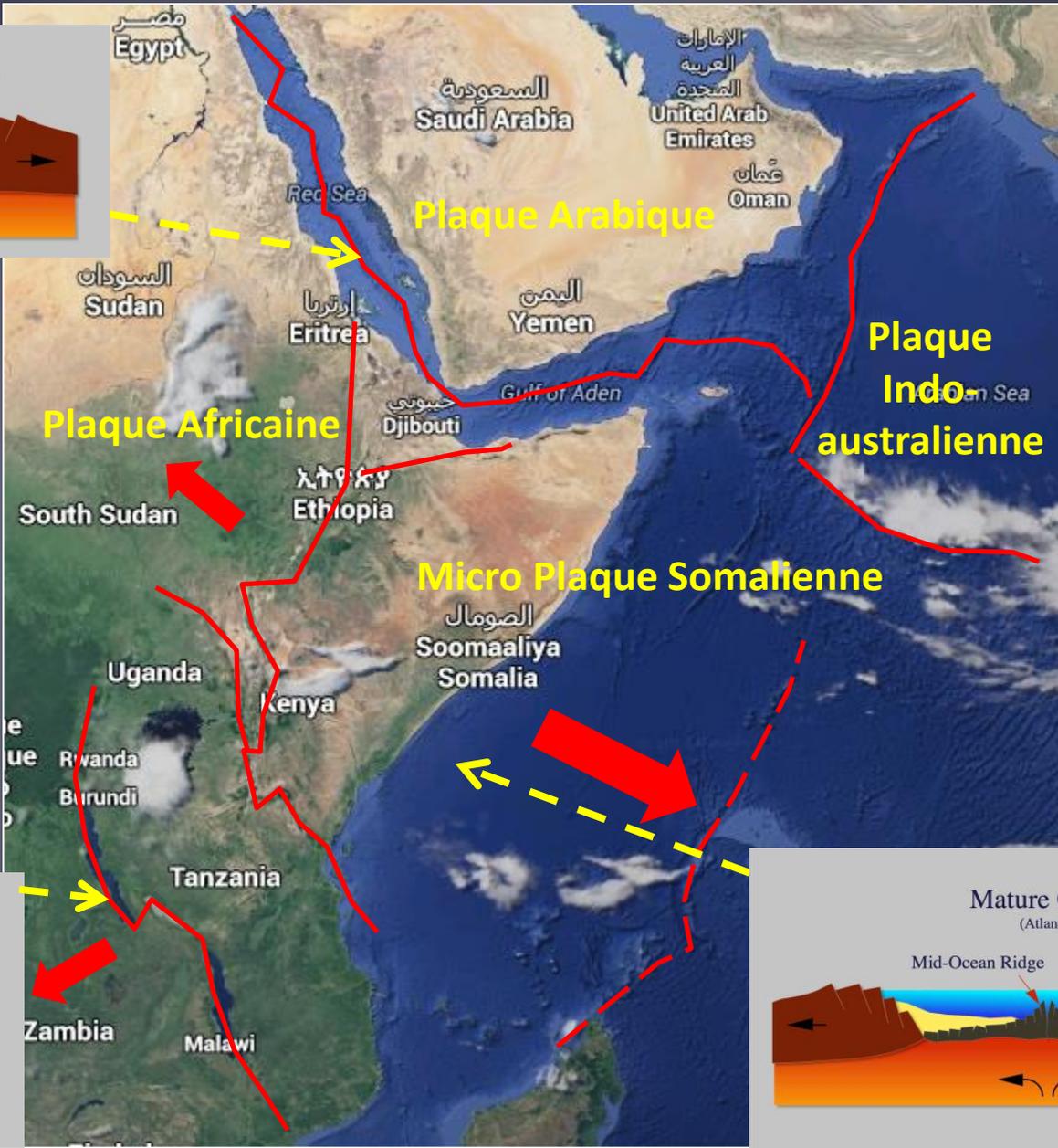


EUROPE

- Bresse
- Limagne
- Rhin



Rifts



Rifts Africains

Afrique (Kenya et Ethiopie) 216 MW (2010)

- Forte extension
- Moho, limite croûte et lithosphère, peu profond (14km) dans le rift
- Flux thermique élevé et gradient géothermique fort 200°C/km
- Hydrologie contrôlée par les bordures du rift, le réseau de failles et l'axe volcanique central qui rechargent les nappes situées au fond du rift

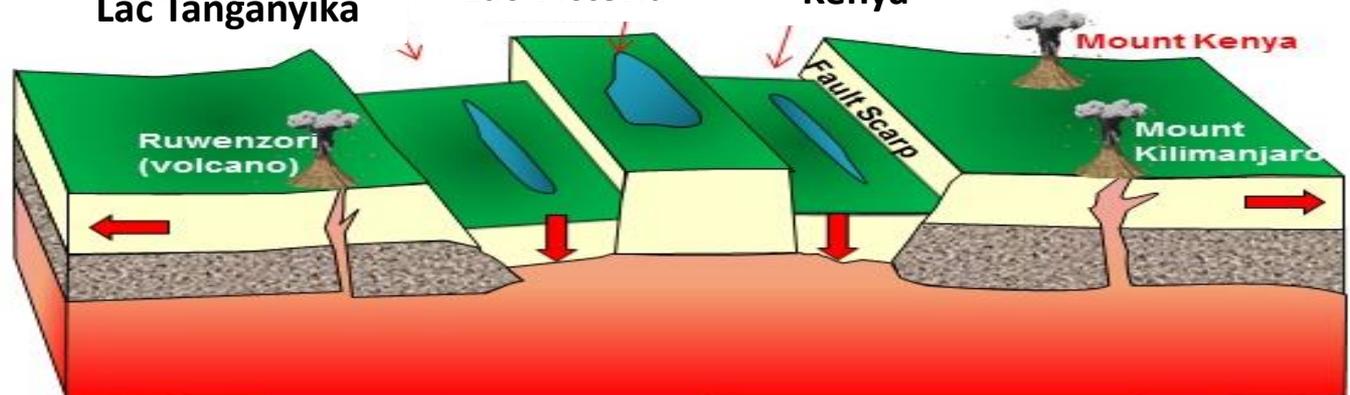
Exemple du Kenya: 280 MW (400 MW installés)

- Complexe volcanique d'Olkaria, laves, basaltes, trachytes, tufs
- 110 forages sur 70 km² dont 50 en production
- Zone de production de vapeur vers 1000 m
- 50% de l'électricité
- Impact sur l'écosystème de certains parcs?



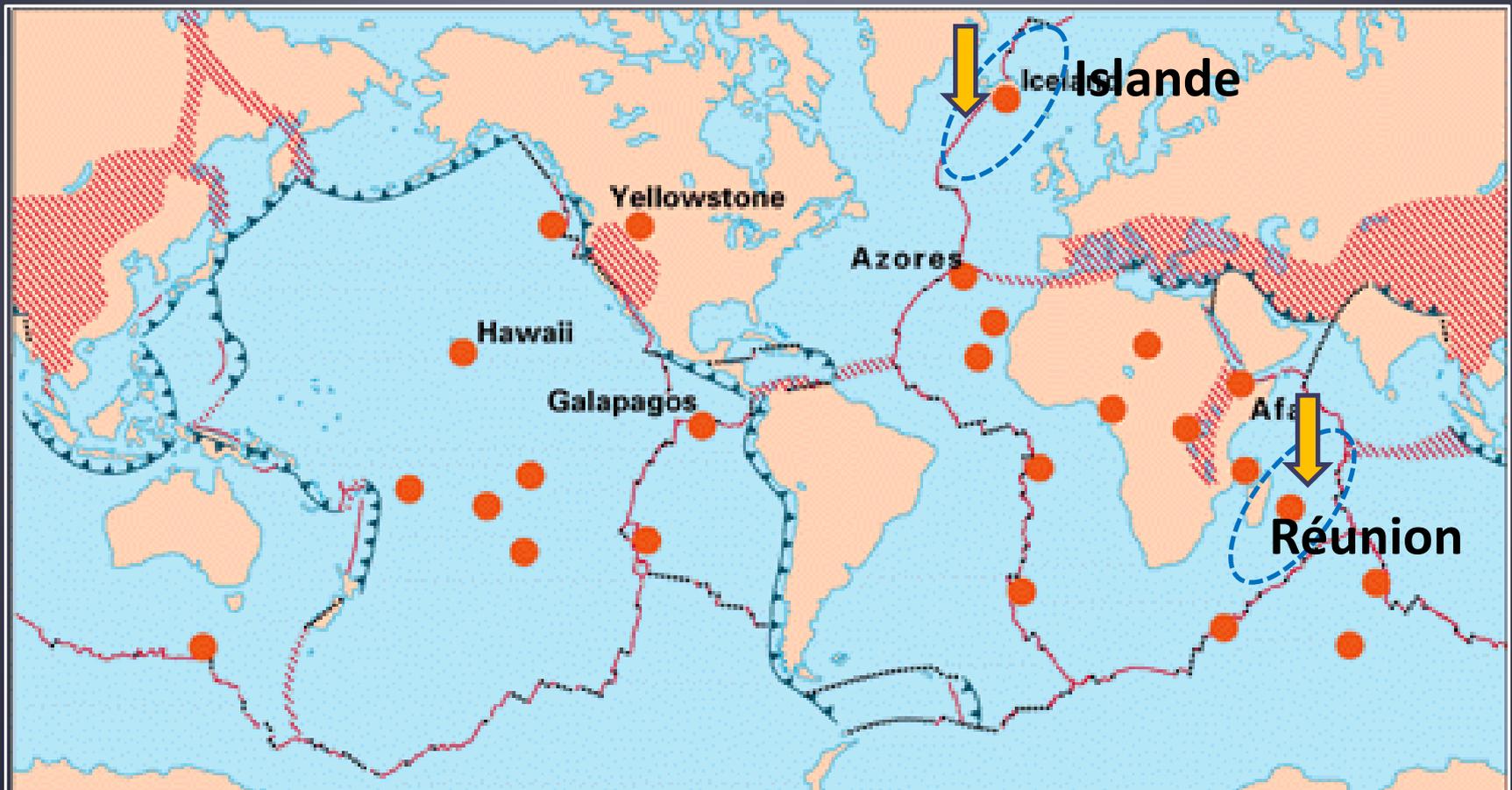
- East African Rift Zone
- Plate Boundaries
- ▲ Active Volcanoes

Rift Valley - Ouest : Plateau Central Rift Valley - Est
Lac Tanganyika Lac Victoria Kenya



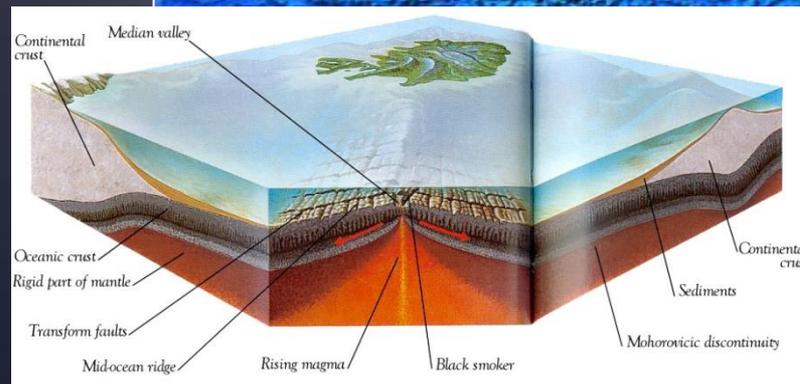
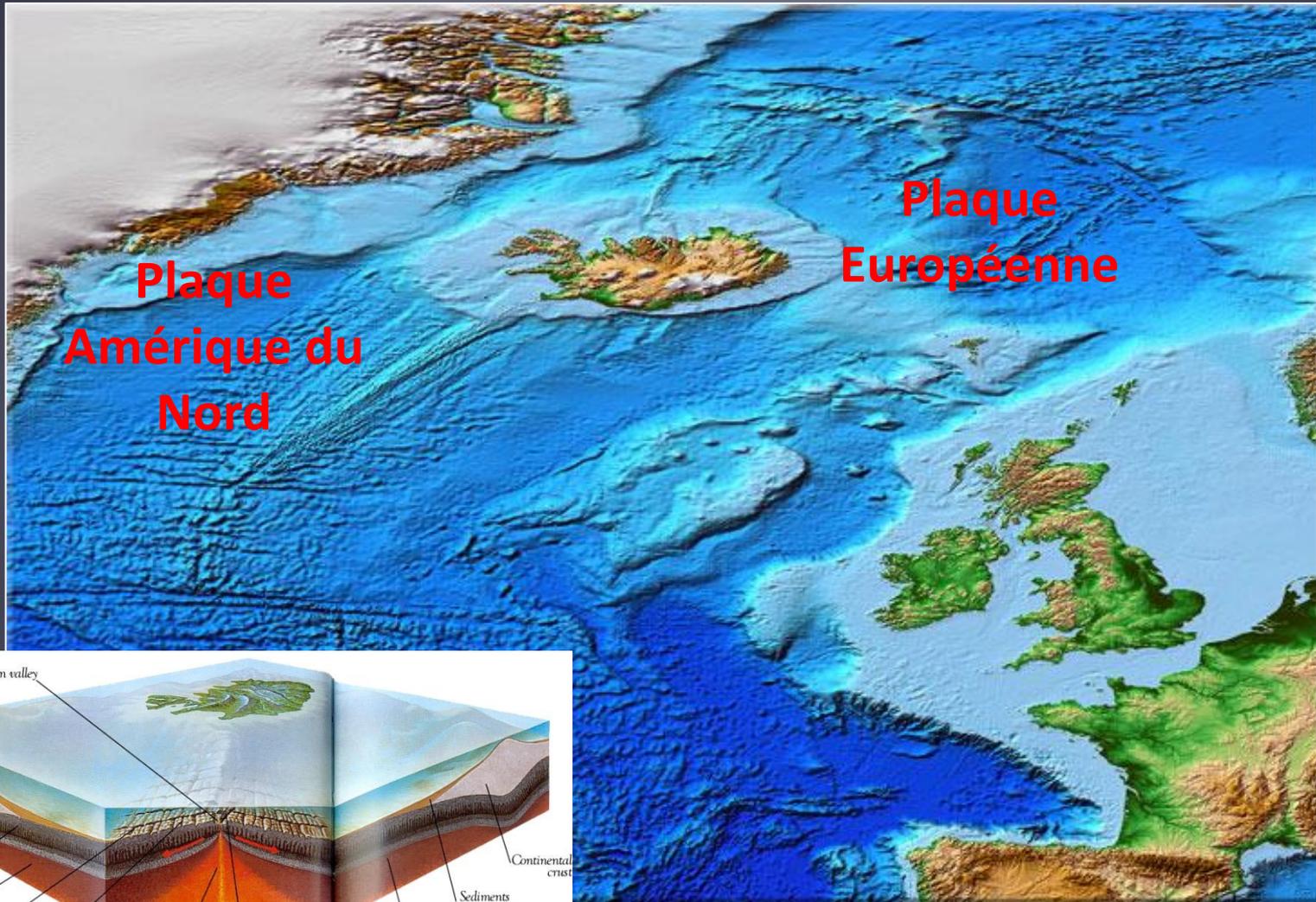
EXEMPLES #3 : Rides Medio Océaniques

Points chauds « Hot Spots »

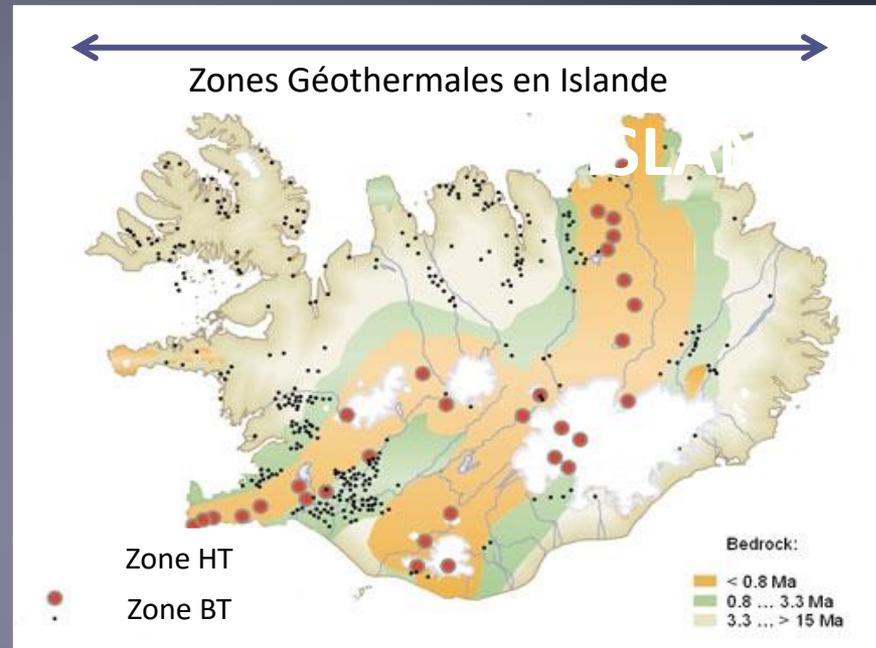


Rides Medio Océaniques et « Hot Spots »

ISLANDE

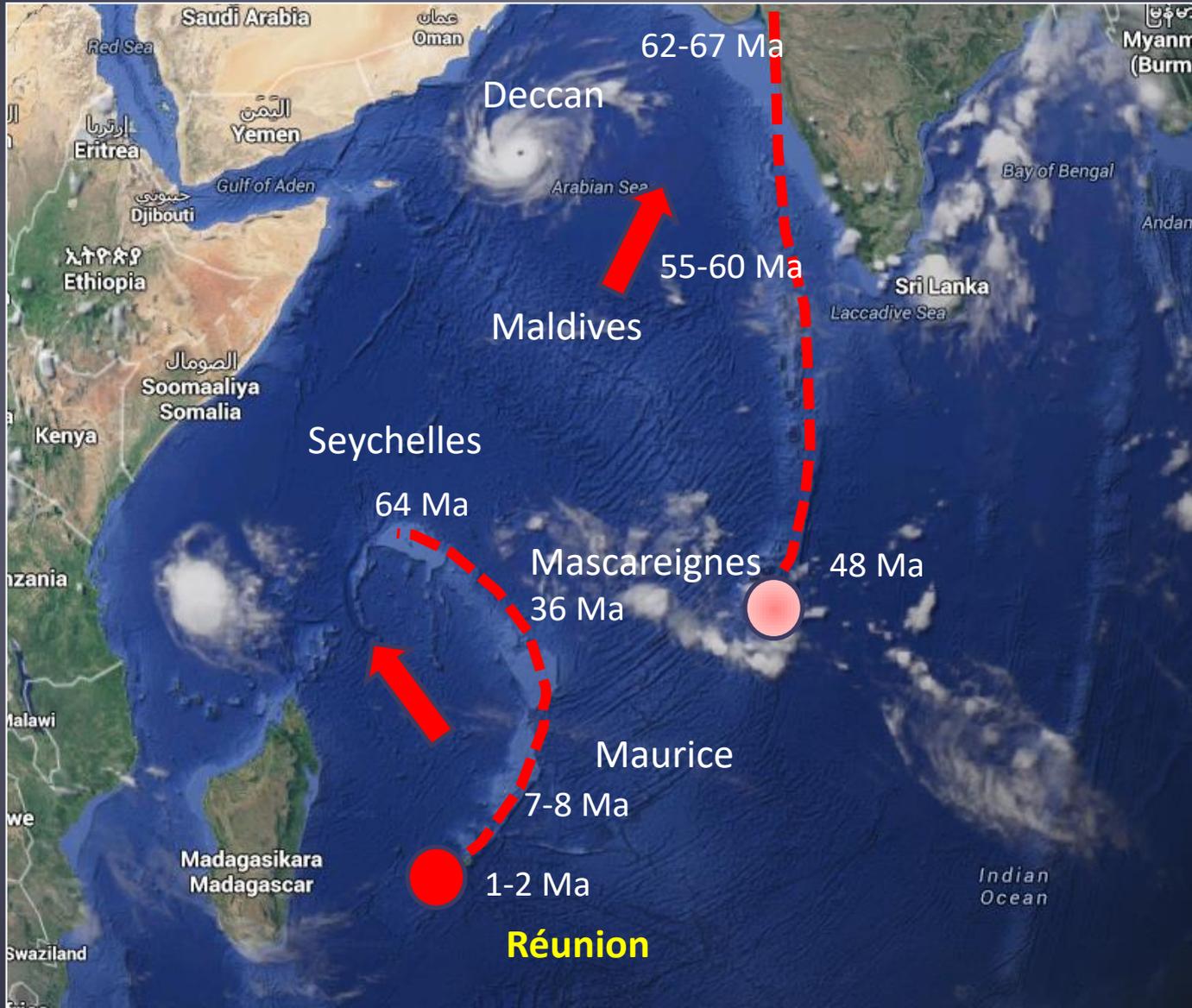


LA GEOTHERMIE EN ISLANDE – Cas Unique



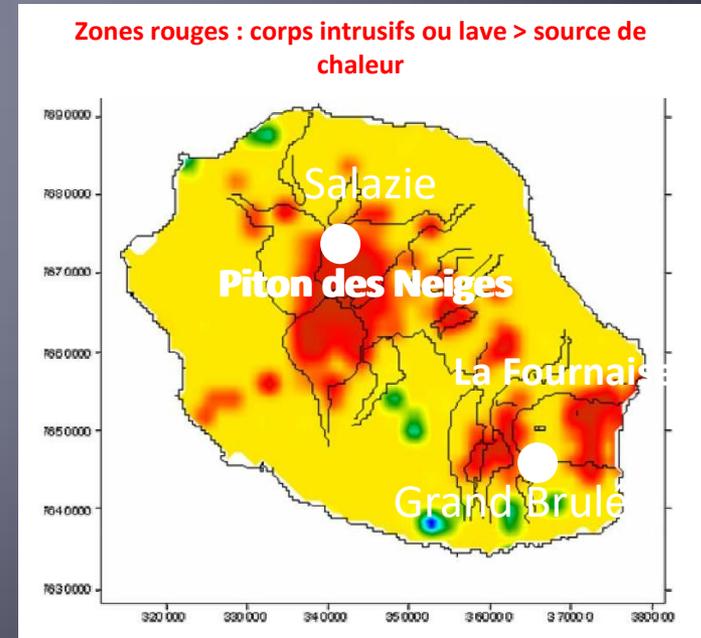
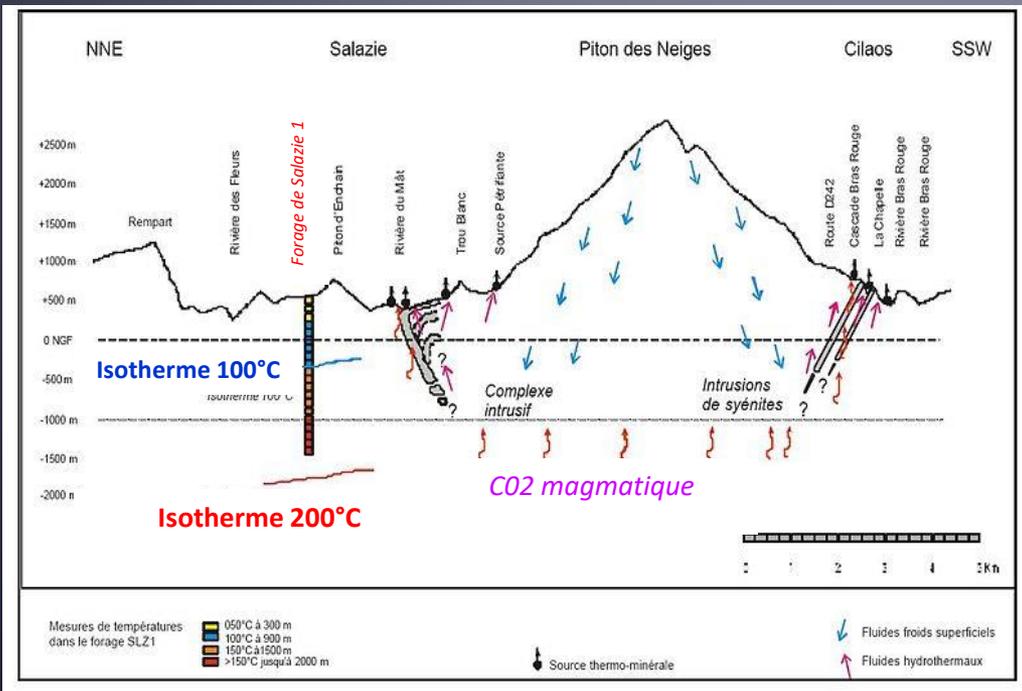
- ride medio océanique active entre deux plaques tectoniques avec zone de hot-spot, remontée de magma profond et volcanisme intense
- gradient > 200°C/km (en 2009 magma atteint à 2100 m- 900°C!)
- 30 volcans, 600 sources chaudes et geysers
- 5 grandes centrales électriques de 60 à 213 MW chacune
 - 26% de l'énergie électrique et 87% du chauffage des bâtiments et eau chaude (pour 330000 habitants !), et les serveurs informatiques très gros consommateurs
 - alimente aussi les industries de l'aluminium et du ferrosilicium

HOT SPOT OCEAN INDIEN



Projet (abandonné) de géothermie à la Réunion

- L'île de la Réunion: ensemble de volcans le long d'une ligne océanique de points chauds
- Deux forages test (1985/86): Salazie & Piton de la Fournaise : **gradients trop faibles à 9,5°C/100m et 5°C/100m**
- Projet de nouveaux forages au Piton de la Fournaise pour rechercher des gradients plus élevés, mais en zone en voie de classement d'où abandon du projet

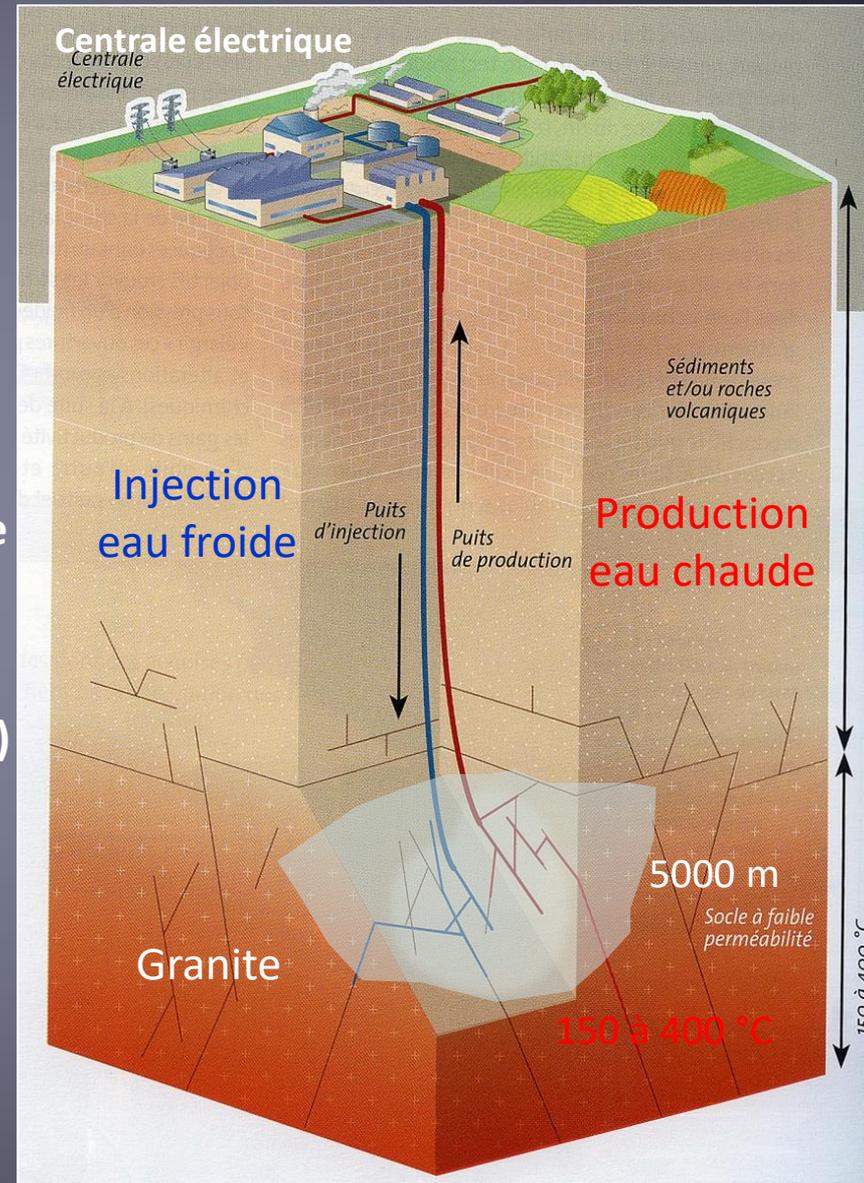


GÉOTHERMIE HAUTE ÉNERGIE INTRA-CONTINENTALE

GÉOTHERMIE HAUTE ÉNERGIE INTRA-CONTINENTALE EXPÉRIMENTALE

Soultz (Alsace)

- **Conventionnel** : Production d'électricité géothermique à partir d'aquifères dans des formations géologiques naturellement perméables
- **Système géothermique stimulé EGS (Enhanced Geothermal Systems)** crée ou améliore artificiellement des réservoirs géothermiques en profondeur en injectant de l'eau dans les roches depuis la surface --- > **fracturation hydraulique**
- Expérimentation à Soultz-sous-Forêts (Alsace)
- L'eau injectée vers 5000 m est réchauffée à 250°C et remonte sous forme de vapeur
- Actuellement 3 forages
- **Projet pilote de 1.5 MW net. Projet final de 25 MW**

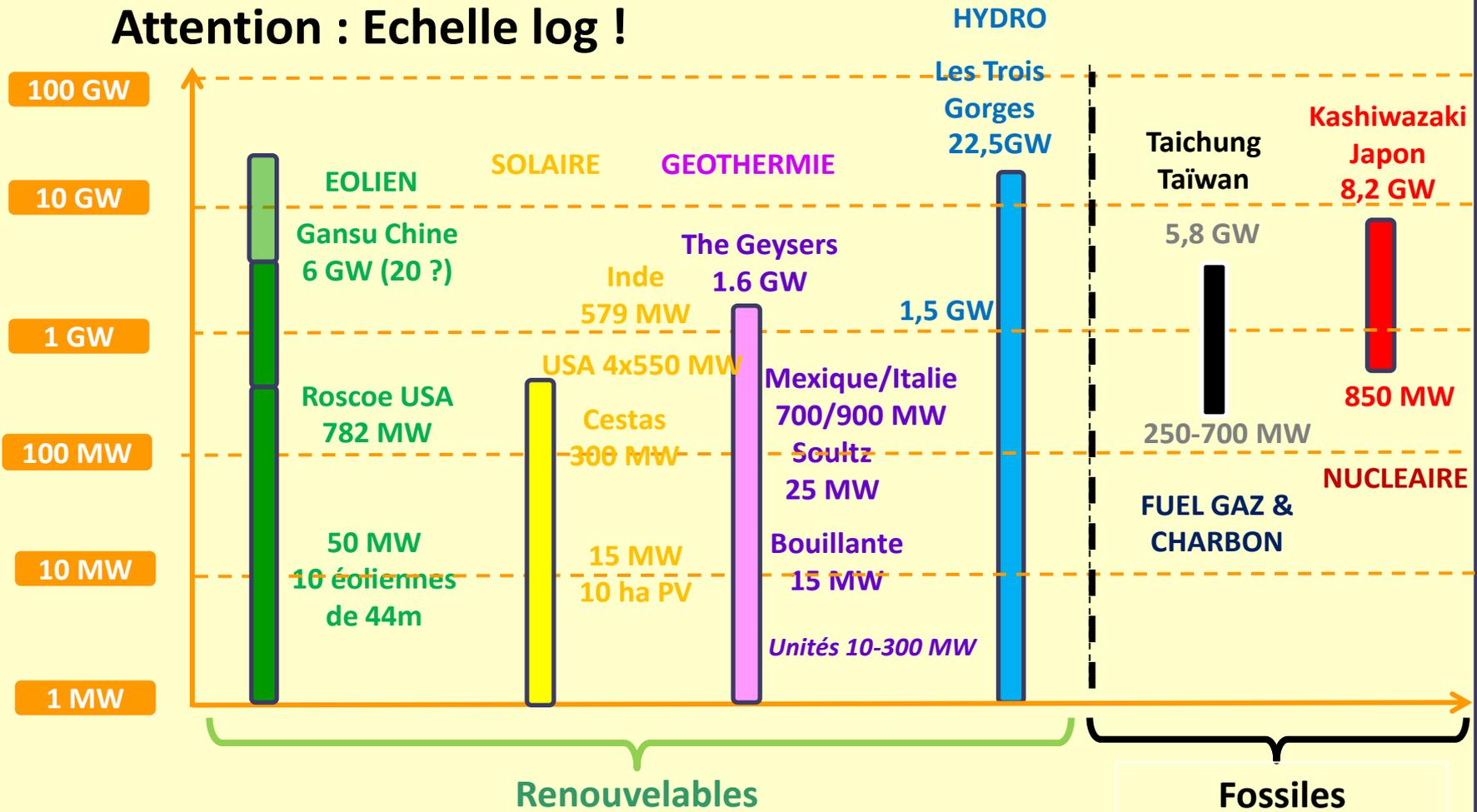


Importance économique

Comparaison des Puissances par Centrale

Attention aux confusions entre unités et centrales, puissance installée et puissance délivrée !

Attention : Echelle log !



L'électricité géothermique a une production continue contrairement au solaire et à l'éolien

Quelques Défis Technologiques

Roches dures à forer (granites, quartzite, laves, roches métamorphiques..., abrasives, fracturées, en sous pression, hautes températures pour les outils, fluides agressifs

Les fluides magmatiques ne sont pas neutres:

- Gaz et éléments associés : CO₂, H₂S, SO₂, HCl, HF
- Eaux riches en minéraux : Na, As, Hg, Sulfates, Li,...

➤ Corrosion

➤ Entartrage

➤ Traitement

➤ Ré-injection

➤ Risques

➤ Coûts

Figure 5: Corroded Steam Vent at the Old Cove Fort Plant



Source: National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Keith Gawlik)

Les volumes d'eau disponibles ne sont pas infinis

➤ Soutirage adapté

➤ Injection

➤ Ré-injection

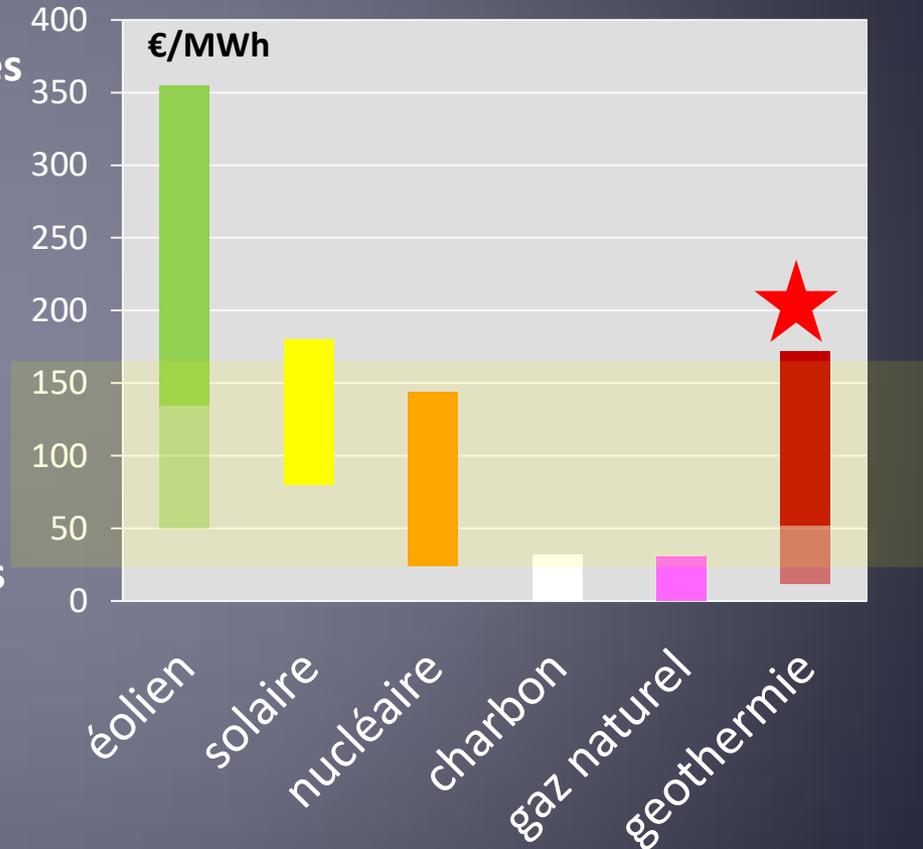
Coût de la Géothermie

Investissements:

- élevés (comparable au nucléaire)
- variables en fonction des gisements, des techniques, des pays
- 1000 à 10 000 €/kW

Coûts de production :

- dans la moyenne comparable au solaire et au nucléaire
- variables en fonction de la qualité des réservoirs géothermiques et de la localisation géographique :
 - Zones favorables 12 à 40 €/MWh
 - Europe continentale : 40 à 120 €/MWh



Géothermie Haute énergie - Limitations

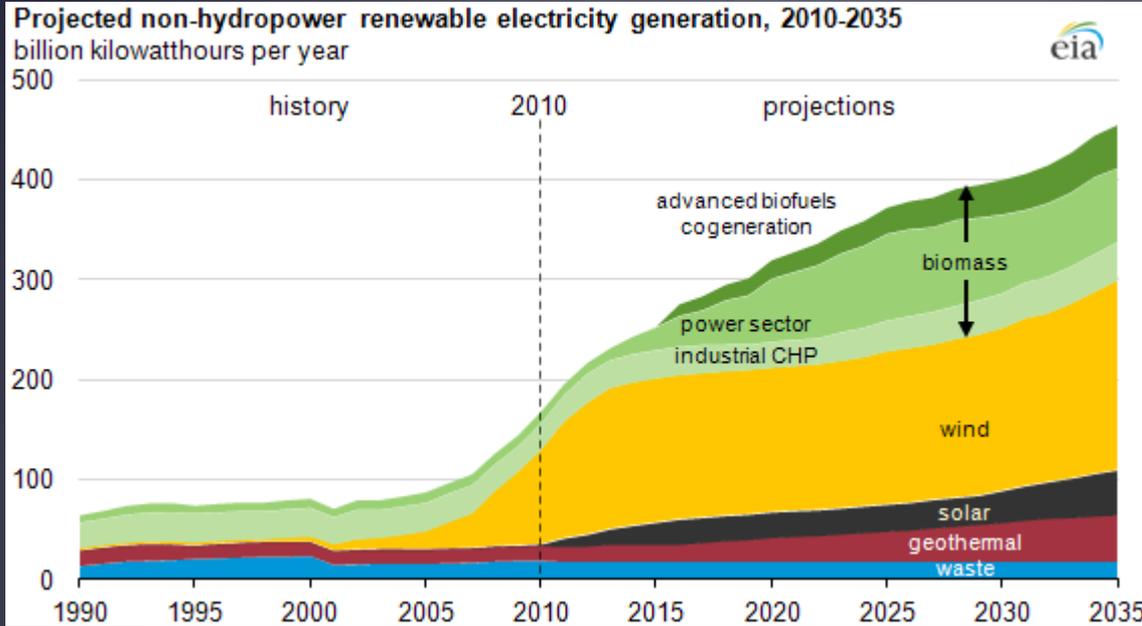
Avantages:

- disponibilité constante
- possibilité de cogénération
- puissance générée pouvant être significative

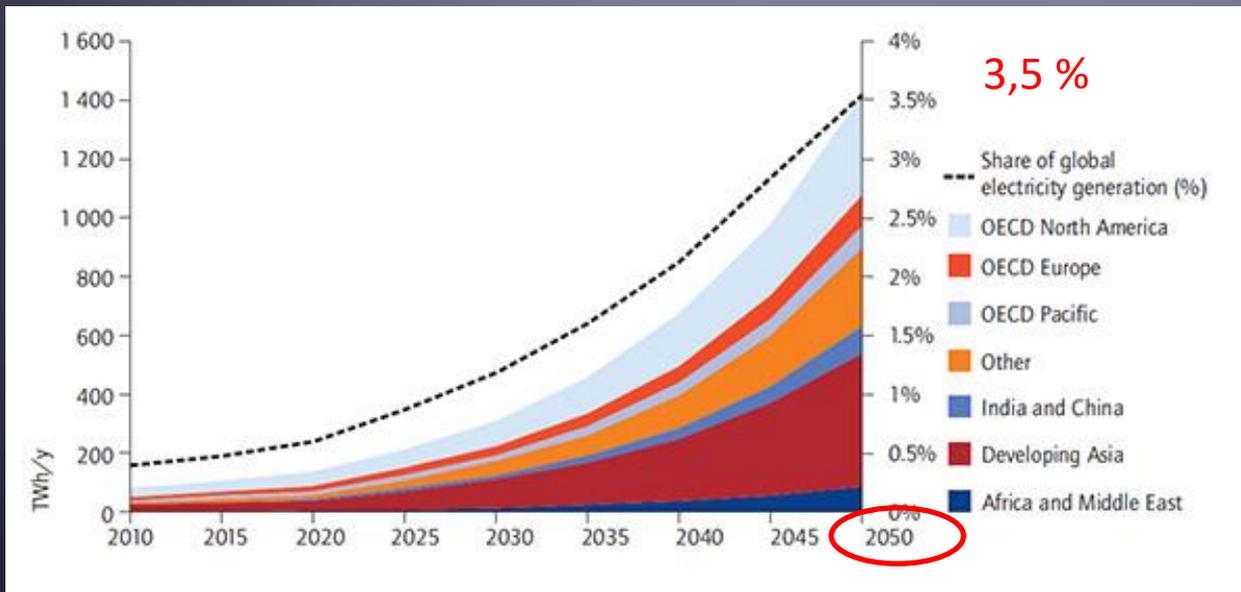
Inconvénients:

- zones « utiles » géographiquement limitées
- nécessité d'un aquifère important et actif
- investissement élevé: forages, pompages
- risques d'exploration, incertitudes sur débits et températures
- coût d'entretien élevé : corrosion , entartrage
- production calorifique se transportant très mal

Part de la Géothermie dans les renouvelables



A l'échelle des besoins mondiaux la géothermie reste une forme d'énergie mineure



CONCLUSION

- **La Géothermie haute énergie est une énergie renouvelable à fort potentiel de génération électrique mais de par sa nature limitée à des zones restreintes sur le Globe**
- **La Géothermie basse énergie est d'un usage plus répandu mais essentiellement calorifique donc local et pour de petites unités**
- **La Géothermie possède la caractéristique classique des énergies renouvelables : elle est optimale d'un point de vue environnemental et économique quand adaptée à des conditions et des échelles locales**

MERCI
QUESTIONS ?