

La Géothermie dans les Pyrénées

Origine, usages et perspectives

Résultats projet (équipes EPOC : GeolSed - TGM), collaborations avec projet PyrTherm (OMP)

Adrien EUDE, PRAG

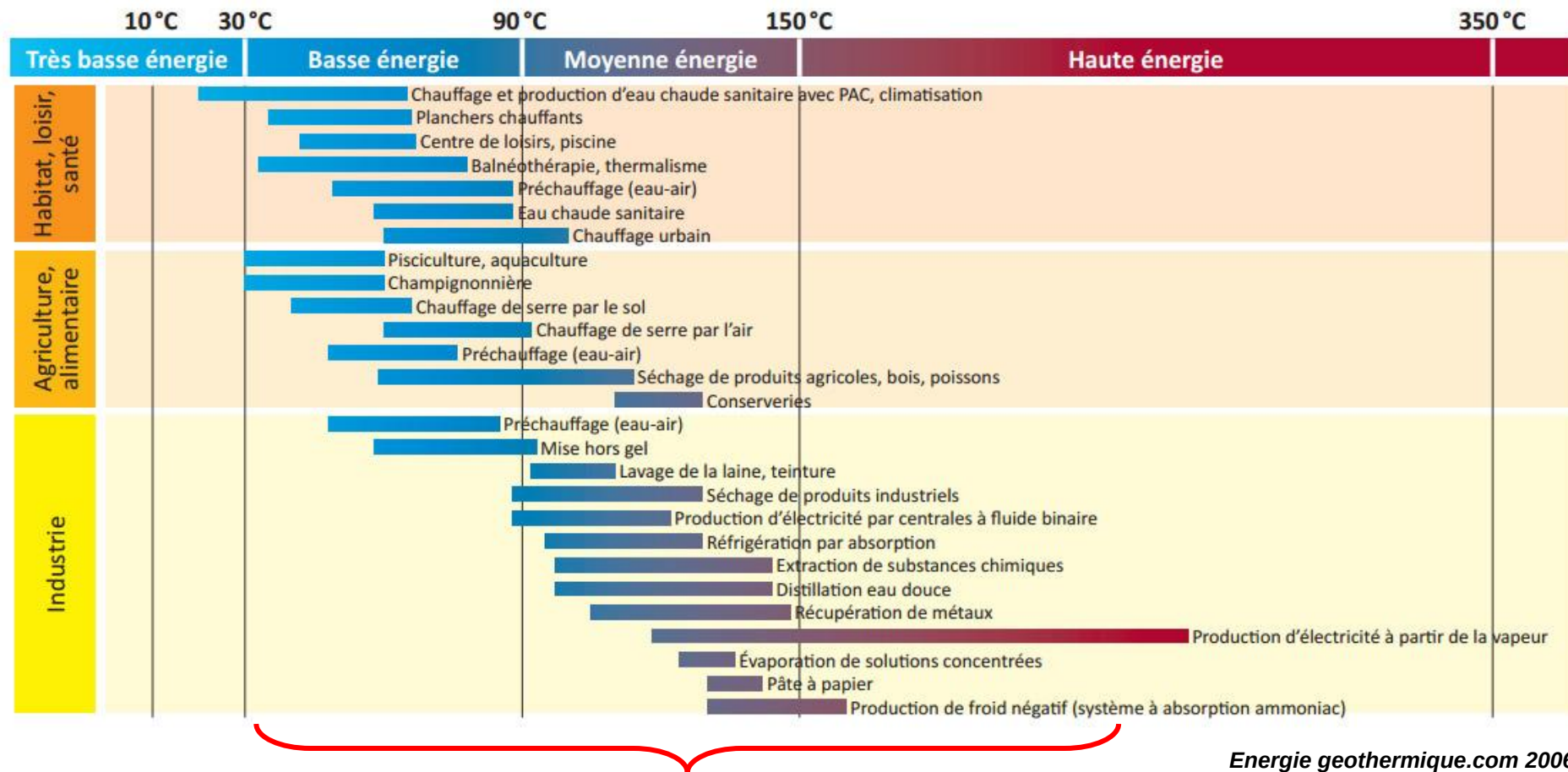
Les intermèdes de l'OASU, le 2 décembre 2025



Station thermale des Eaux-Chaudes (Hautes-Pyrénées) : Réservoir mixte (karsts crétacés + granodiorite fracturée)

La géothermie récupère les calories du sous-sol via des fluides : systèmes *fermés* ou *ouverts* vis-à-vis des nappes phréatiques

- Géothermie de surface < 200m : déploiement massif couplé aux PAC
- Géothermie profonde > 200m : développement important dans les bassins séd.



Energie geothermique.com 2006

Le gisement géothermique français : production de chaleur

Usage direct de la chaleur (état 2018)

● Opérations géothermales pour la production de chaleur (en fonctionnement)

Ressources potentielles ou prouvées

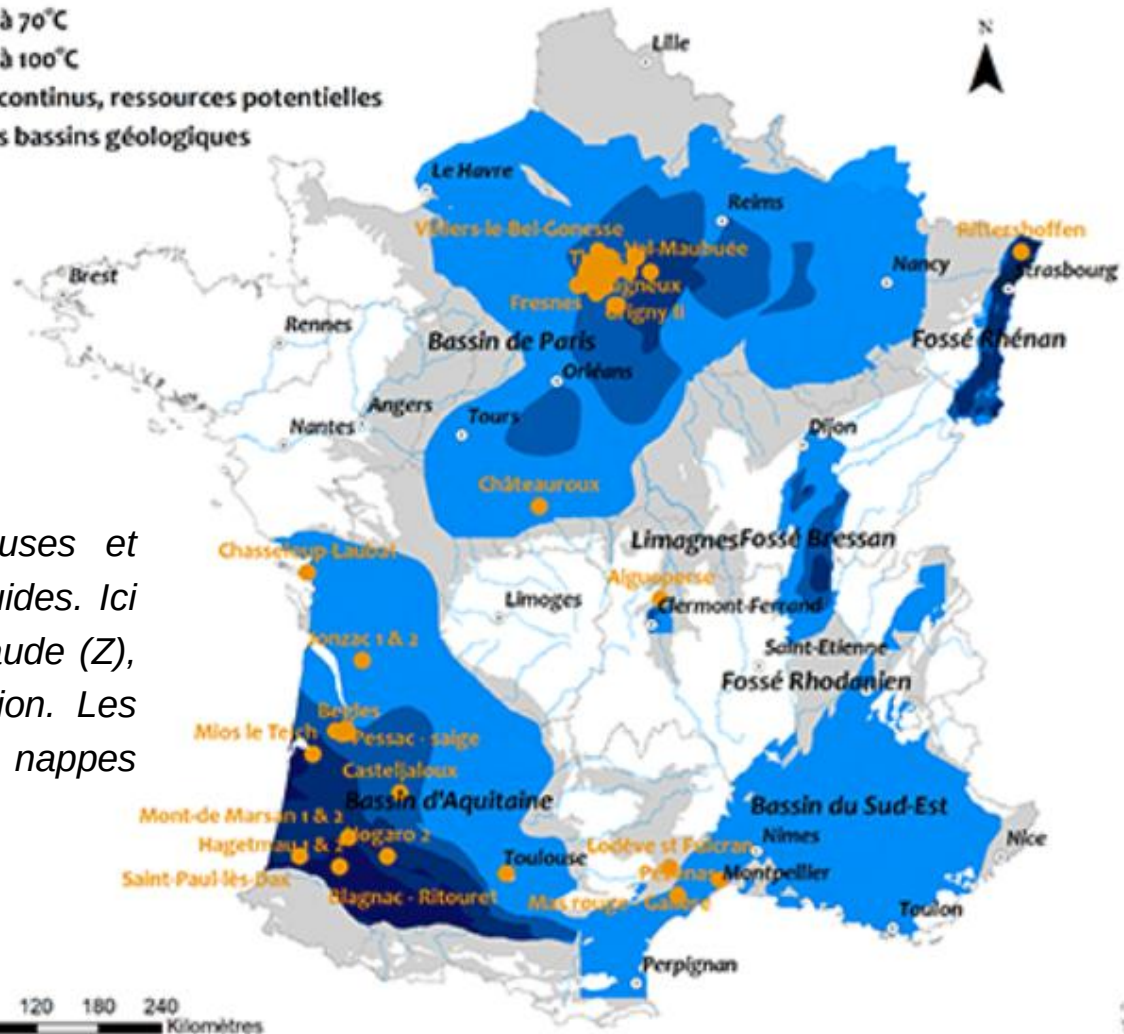
■ supérieure à 70°C

■ supérieure à 100°C

■ Réservoirs continus, ressources potentielles

■ Emprise des bassins géologiques

- Réservoir = roches poreuses et perméables remplies de fluides. Ici de l'eau plus ou moins chaude (Z), minéralisée et sous pression. Les réservoirs sont des nappes phréatiques (ou aquifères).



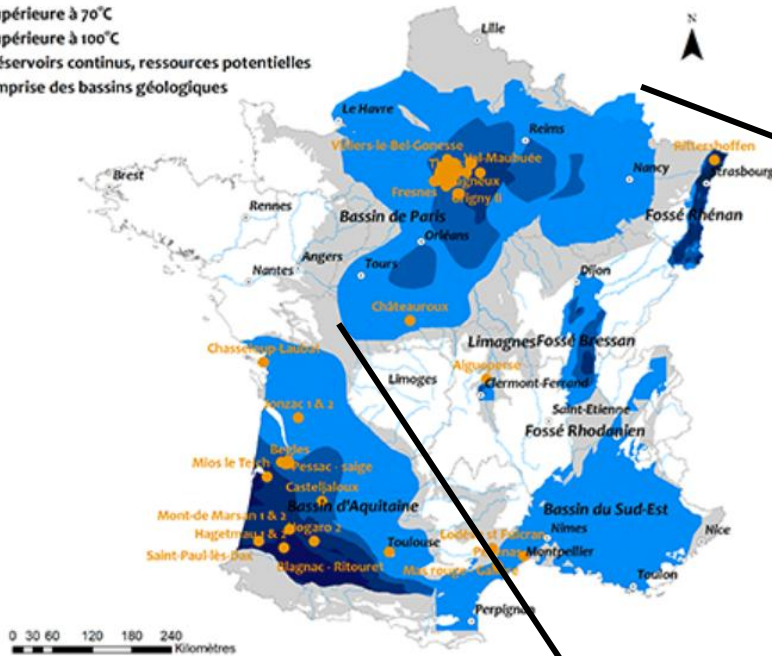
Le Dogger du bassin parisien

Usage direct de la chaleur (état 2018)

● Opérations géothermiques pour la production de chaleur (en fonctionnement)

Ressources potentielles ou prouvées

■ supérieure à 70°C
■ supérieure à 100°C
■ Réservoirs continus, ressources potentielles
■ Emprise des bassins géologiques

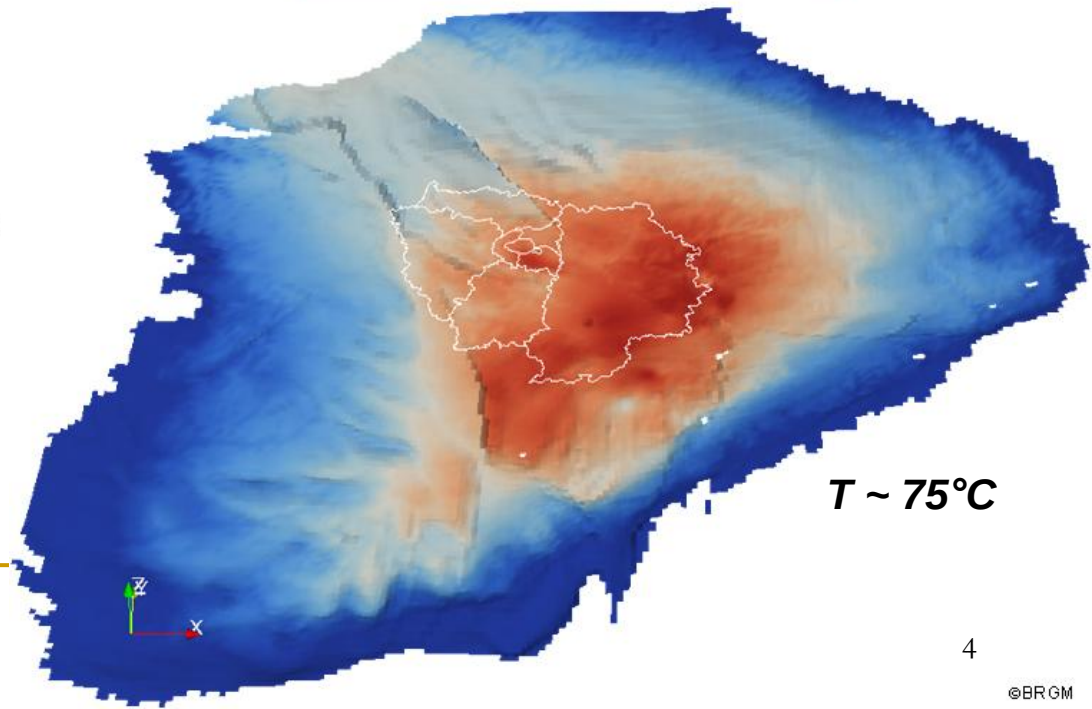
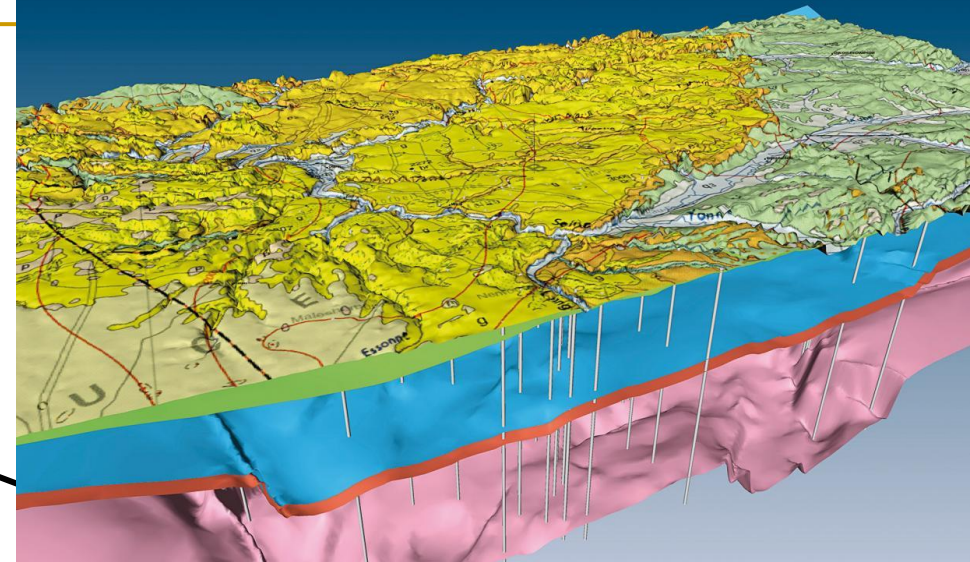


➤ Densité de population

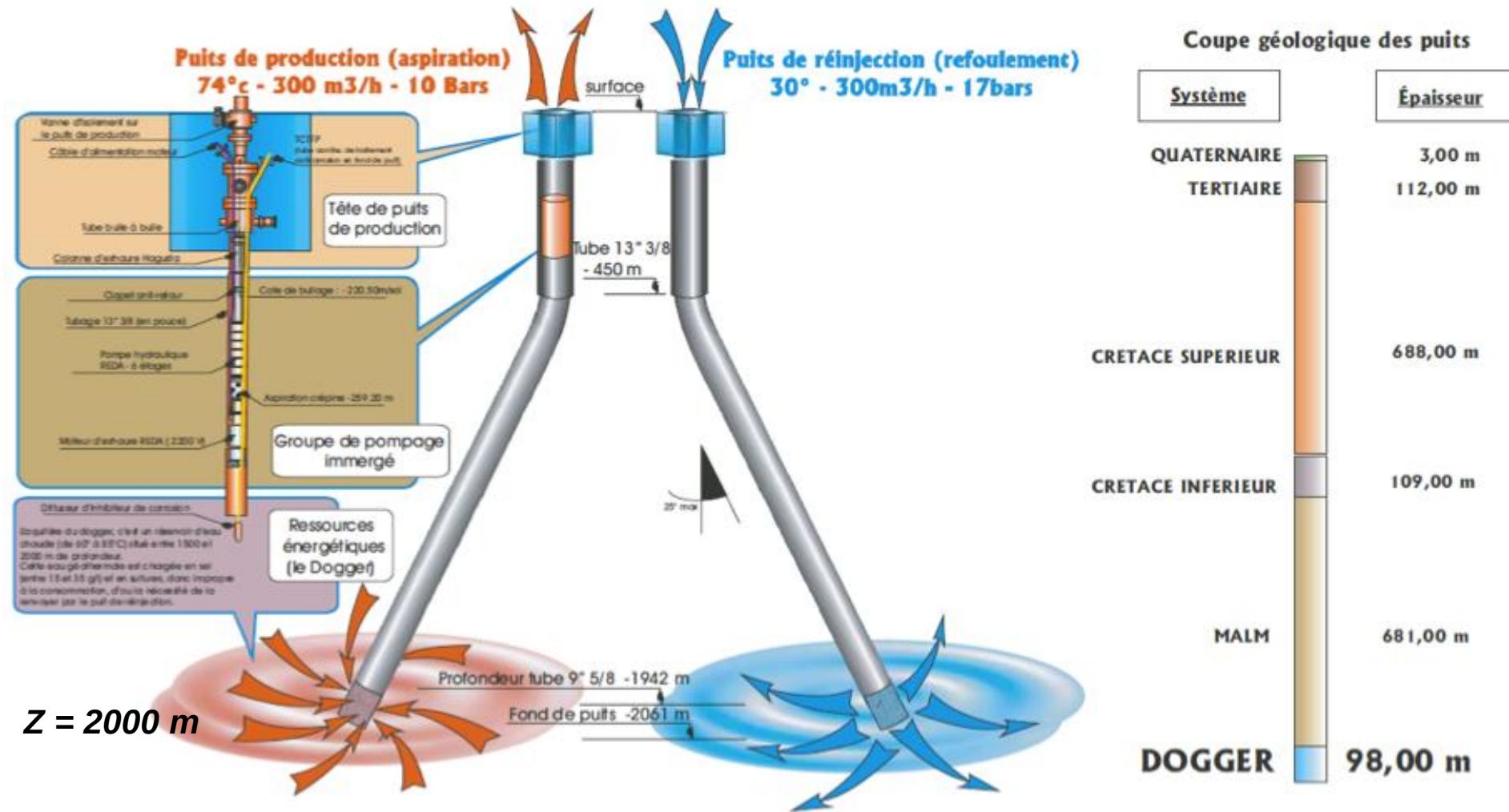
X

➤ Réservoir chaud, connu et accessible

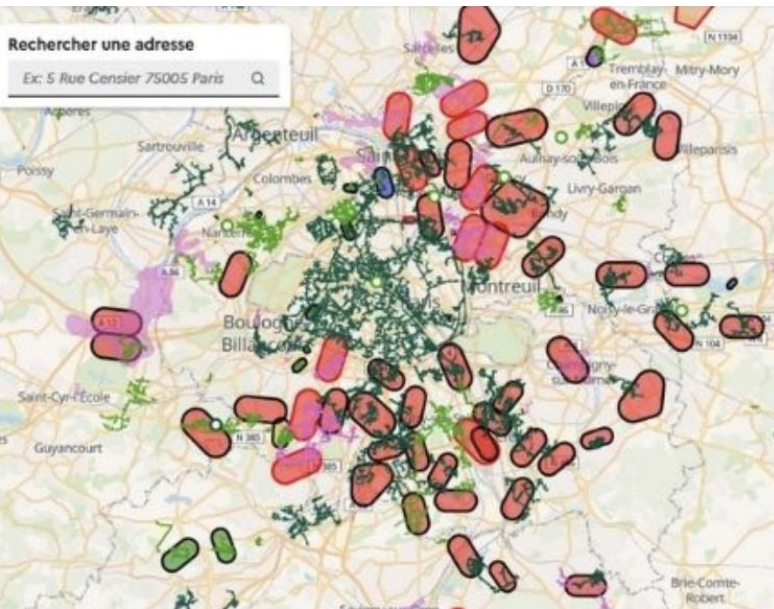
ADEME - BRGM 2018



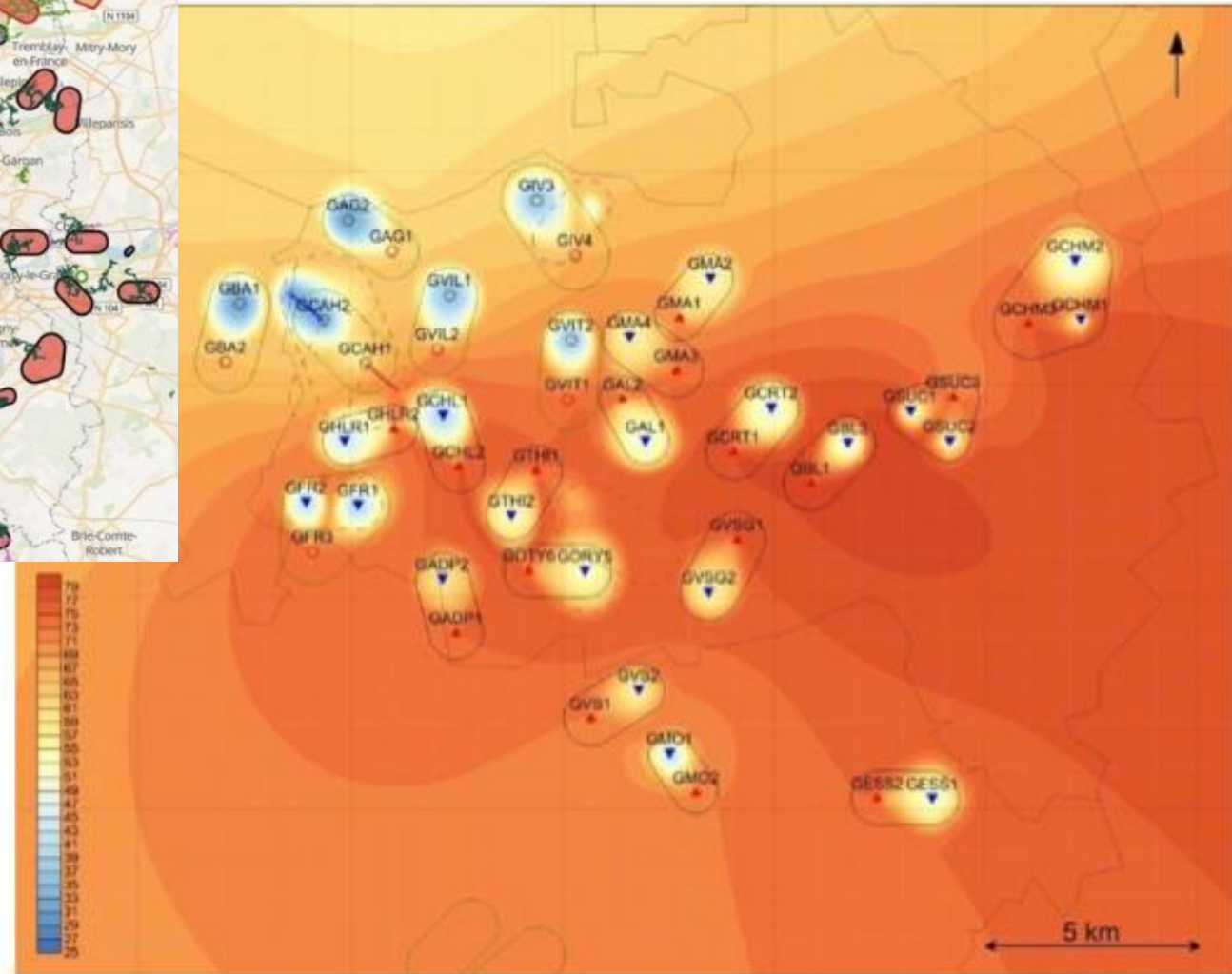
Les doublets géothermiques : écart faible en surface, 1 à 2 km en profondeur. Utilisation quasi-permanente pour l'eau sanitaire



Durée de vie d'une *gélule* (périmètre d'exploitation) : 30 à 50 ans



- Amélioration permanente des connaissances sur le réservoir
- Forte diminution du risque
- Diminution des coûts
- Effet d'emballement



Carte des opérations d'exploitation et d'explo. DRIEAT Juillet 2025

Températures mesurées et modélisées dans l'aquifère vers 2 km. Hamm 2014

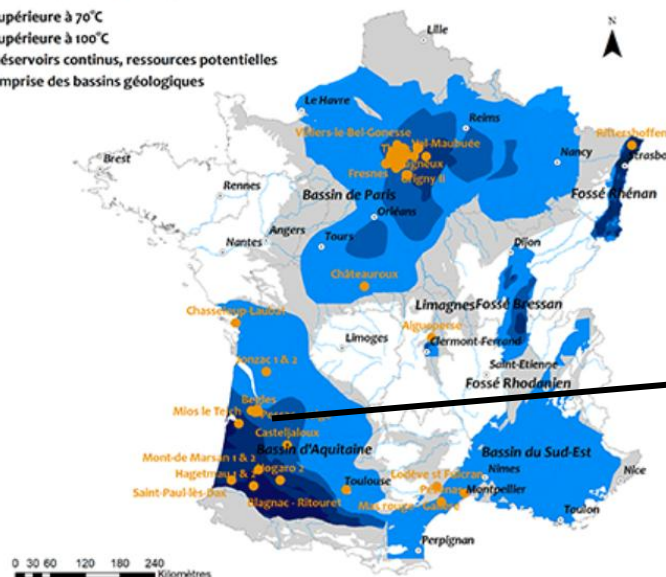
Sous Bordeaux : réseaux de chaleur urbains

Usage direct de la chaleur (état 2018)

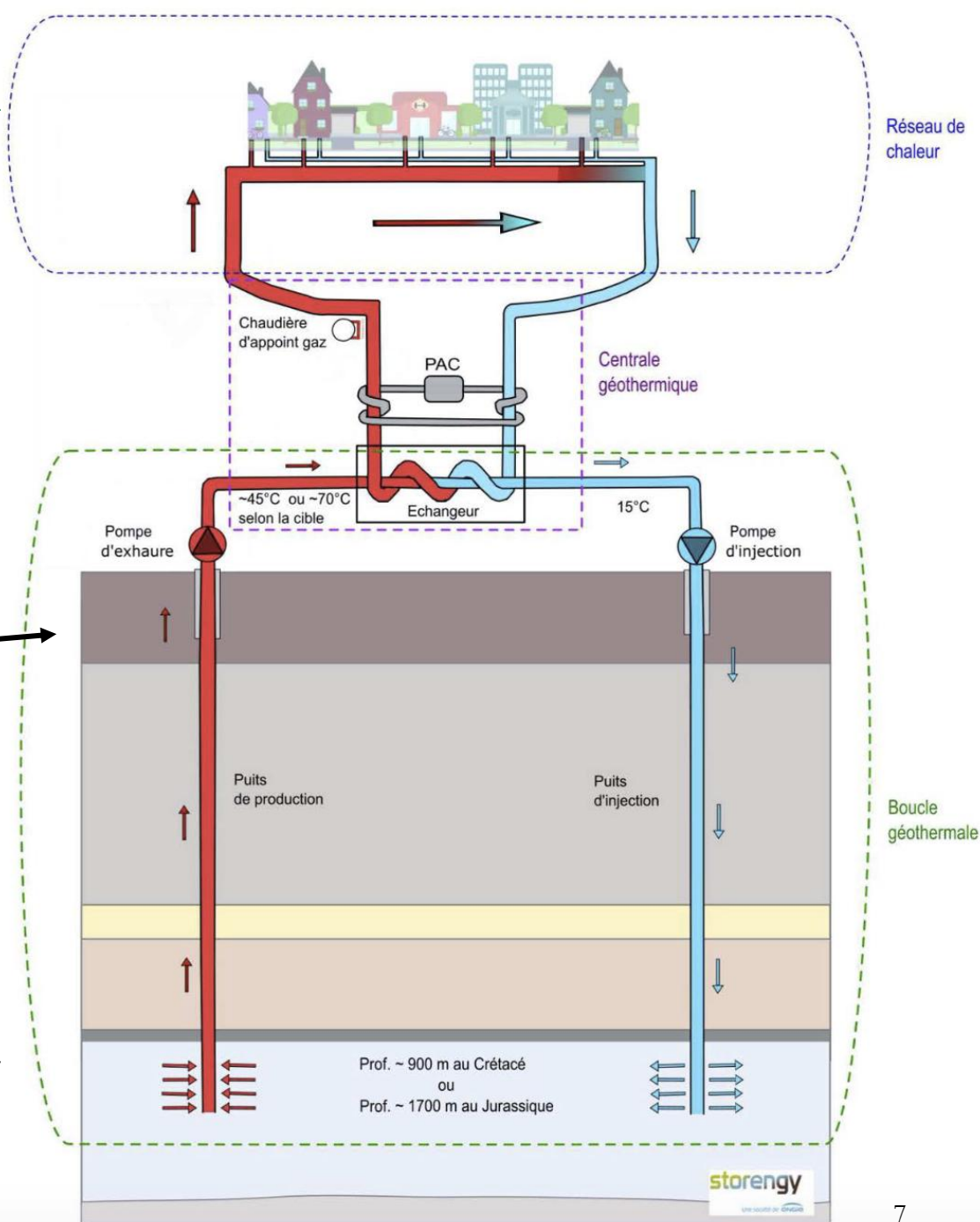
Opérations géothermales pour la production de chaleur (en fonctionnement)

Ressources potentielles ou prouvées

supérieure à 70°C
supérieure à 100°C
Réservoirs continus, ressources potentielles
Emprise des bassins géologiques

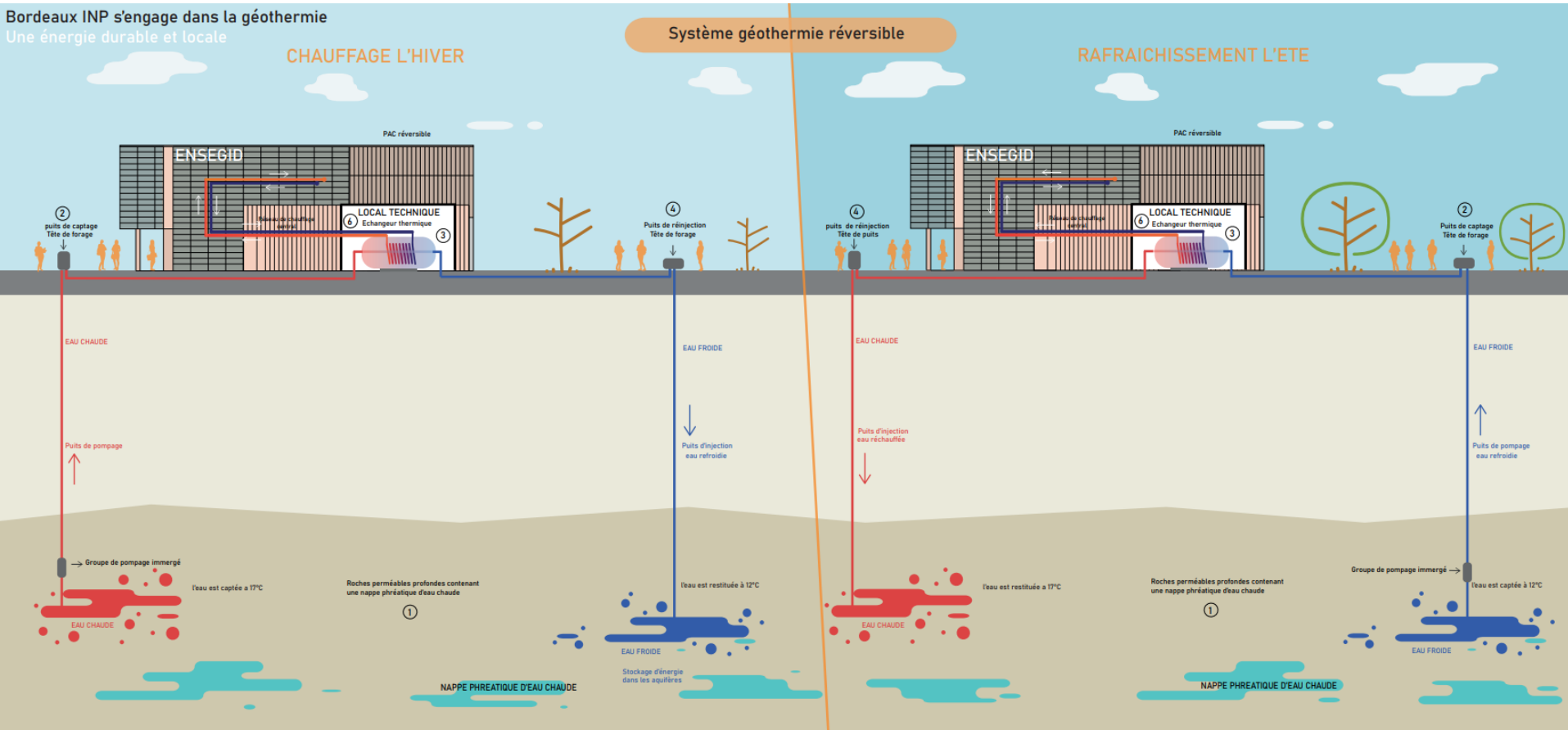


- Densité de population X
- Divers réservoirs : Oligocène (15°C), Éocène (eau potable de la métropole), Crétacé (40-45°C), Jurassique (60 à 70°C)



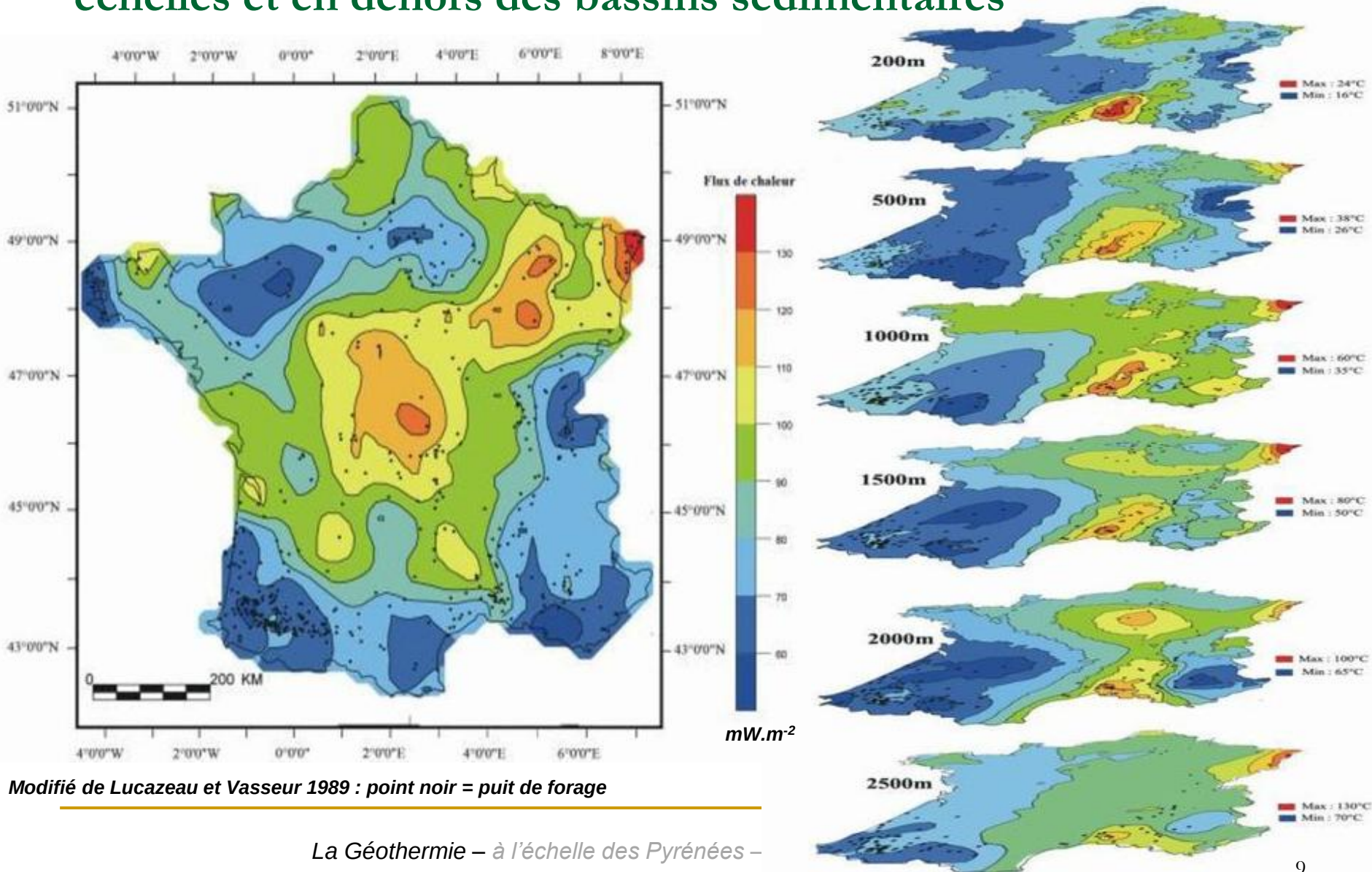
Système ATES : Aquifer Thermal Energy Storage (géothermie réversible et stockage de chaleur) de l'ENSEGID

Bordeaux INP s'engage dans la géothermie

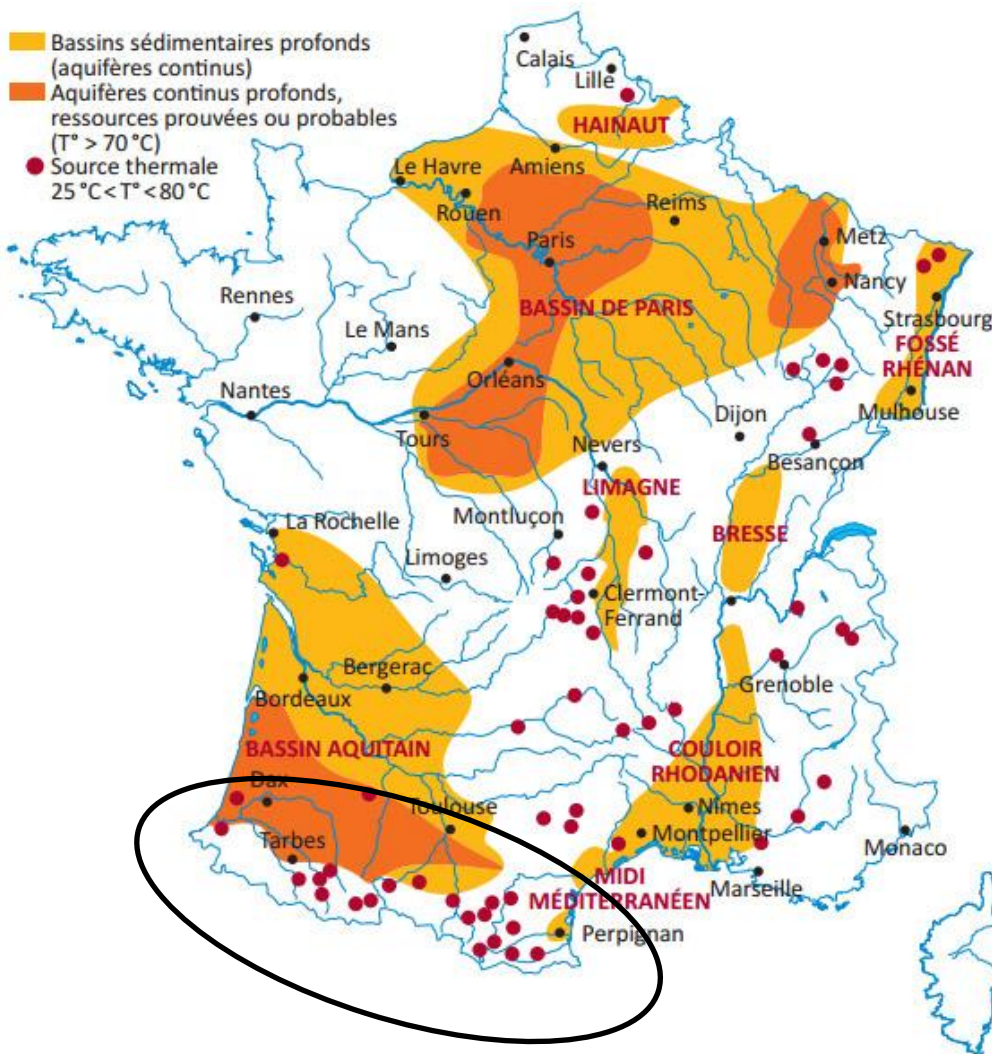


ENSEGID Bordeaux INP 2020

En France, flux de chaleur inégal et manque de données à petites échelles et en dehors des bassins sédimentaires



Place des Pyrénées dans le gisement géothermique français ?



Les résurgences :

- eaux thermales $T > 25^{\circ}\text{C}$
 - Chaudes-Aigues $T = 82^{\circ}\text{C}$
- (Thèse 2025 Emmy Penhoët)

Localisation des résurgences :

- anomalie du gradient géothermique (Massif central, fossé rhénan)
- chaînes de montagnes (relief), en particulier les Pyrénées.

➤ Pourquoi ?

➤ Est-ce exploité ? Comment ?

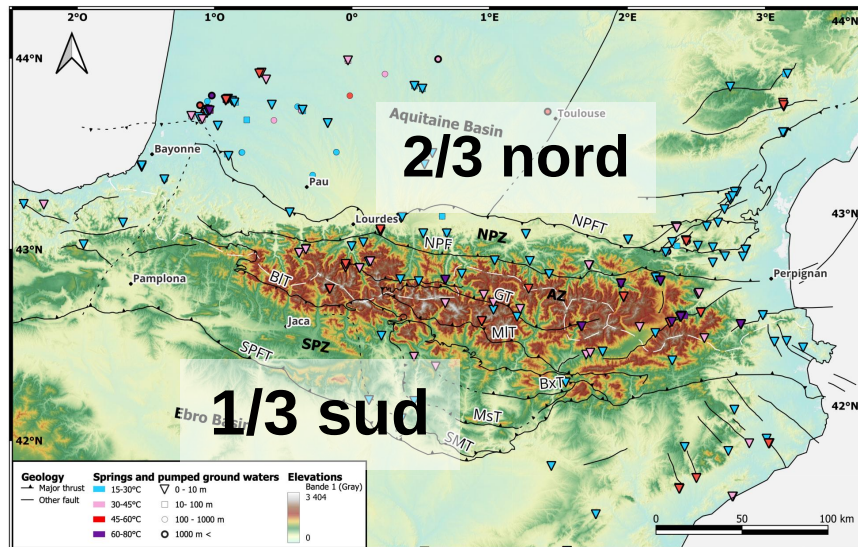
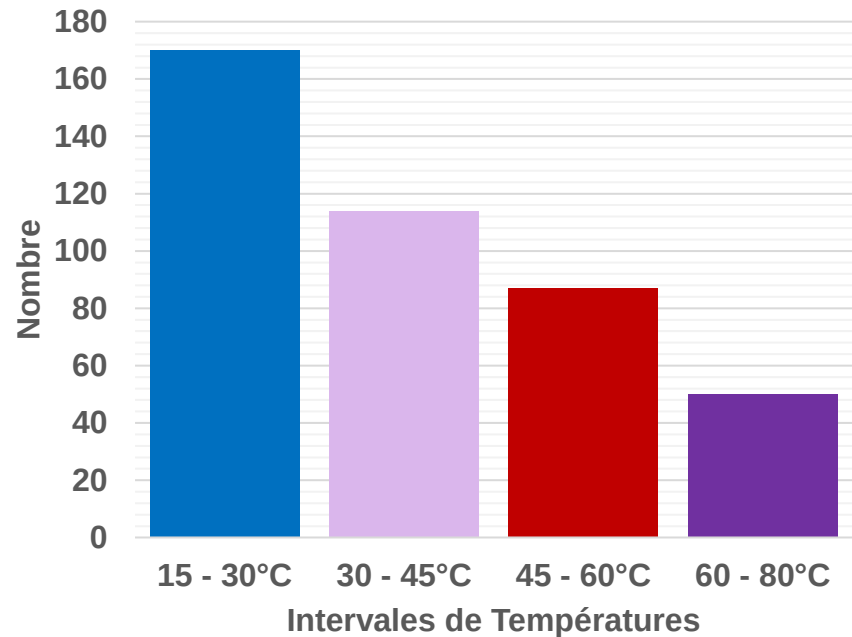
➤ Y existe-t-il des perspectives de production énergétique ?

Energie geothermique.com 2006

Compilation des résurgences et forages hydrothermaux ($T > 15^{\circ}\text{C}$)

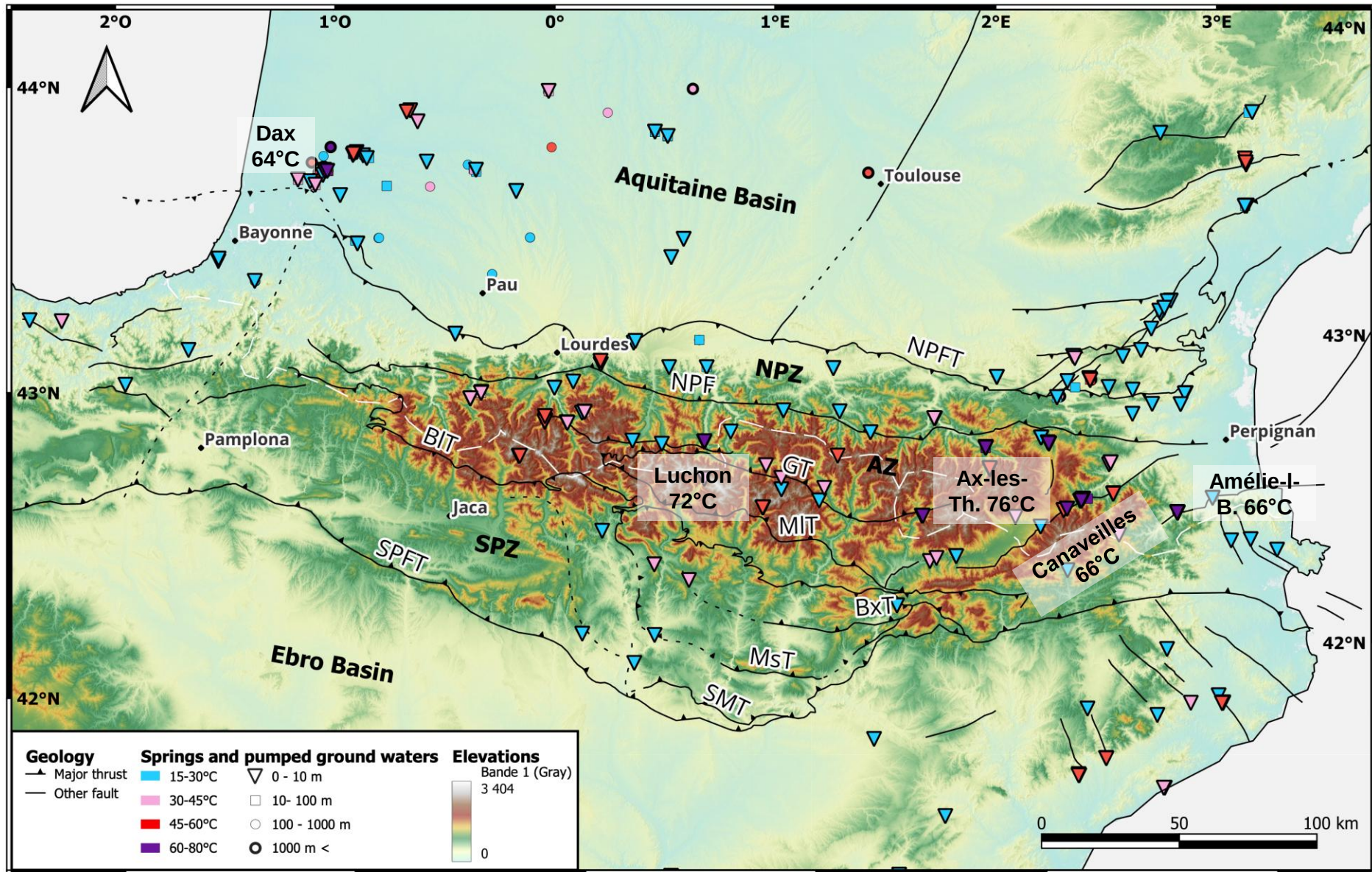
- Données du (BRGM), de l'IGME, de la littérature et nouvelles (collab. TGM)
- Chimie des eaux aux Températures max., débits, pH, conductivités, minéralisations
- Répertoire de 450 points dont 80 ouvrages et ~370 résurgences hydrothermales naturelles
- Classés par domaines de la chaîne : zones de socle et bassins sédimentaires

ASX	C	Area	Source	ID	ISSUE/REGISTRATION	AUSTR	FIN	X	Y	Z	TXMAX	TXMIN	PH	DELTA
							62	92	12	3	2	3		
154	EAB	Baie Yeu	149	1077603005	Austr	Remmes les Baies	42,92	92,32	337	37,07	44,07	37,0	2,6	
155	EAB	Baie de Launay	150	1077603005	Austr	Remmes les Baies	42,92	92,32	332	42,0	39,5	3,9	2,6	
156	EAB	Forage Maria	151	1077603005	Austr	Remmes les Baies	42,92	92,32	312	15,0	12,0	13,0	7,30	1,3
157	EAB	Forage Yeu	152	1077603005	Austr	Remmes les Baies	42,92	92,32	346	146,0	30,4	35,5	7,30	1,1
158	EAB	Baie Grands	153	1077603004	Austr	Remmes les Baies	42,92	92,32	319	46,0	43,0	7,40	7,2	
159	EAB	Baie Fort	154	1077603004	Austr	Remmes les Baies	42,92	92,32	315	5,0	43,0	44,0	7,2	
160	EAB	Caribbean Les Baies	155	1077603004	Austr	Remmes les Baies	42,92	92,32	285	24,9	28,0	6,90	5,0	
161	EAB	Forage Launay	156	1077603004	Austr	Remmes les Baies	42,90	92,32	300	77,0	15,0	13,4	7,25	3,6
162	EAB	Forage Fontaine	157	1077603004	Austr	Sougraigne	42,99	24,60	727	15,0	7,0	2,70	13,0	0
163	EAB	Sougraigne	158	1077603004	Austr	Sougraigne	42,99	24,60	727	15,0	7,0	2,70	13,0	0
164	NPZ	Forage 146	159	1077603004	PA	Arbonne	43,43	15,53	44	15,5	11,5	6,50	0,0	
165	NPZ	Forage 146 - Plezo B	160	1077603004	PA	Arbonne	43,43	15,53	53	15,7	10,0	6,17	0,0	
166	NPZ	Forage Occident Nord	161	1027740006	PA	Cambo les Baies	43,36	-1,39	21	23,0	4,0	7,1	0	
167	NPZ	Forage Occident Nord	162	1027740006	PA	Cambo les Baies	43,36	-1,39	24	20,0	0,0	7,1	0	
168	NPZ	Forage Occident Sud	163	1027740001	PA	Cambo les Baies	43,36	-1,39	24	20,0	0,0	7,1	0	
169	NPZ	Forage Occident Sud	164	1027740001	PA	Cambo les Baies	43,36	-1,39	24	20,0	0,0	7,1	0	
170	NPZ	Forage Oriental	165	1027740001	PA	Cambo les Baies	43,35	-1,39	21	52,0	18,5	7,10	0,3	
171	NPZ	Bahamas	166	1027740001	PA	Cambo les Baies	43,35	-1,39	21	52,0	18,5	7,10	0,3	
172	NPZ	Bahamas	167	1027740001	PA	Cambo les Baies	43,35	-1,39	21	52,0	18,5	7,10	0,3	
173	NPZ	Bahamas	168	1027740001	PA	Cambo les Baies	43,35	-1,39	21	52,0	18,5	7,10	0,3	
174	NPZ	Bahamas	169	1027740001	PA	Cambo les Baies	43,35	-1,39	21	52,0	18,5	7,10	0,3	
175	NPZ	Source Centrale A	167	1051206004	PA	Ogneu les Baies	43,17	-0,50	319	21,2	7,6	7,6	1,4	
176	NPZ	Source Centrale B	168	1051206004	PA	Ogneu les Baies	43,17	-0,50	319	20,9	7,7	7,6	0,6	
177	NPZ	Forage 3 Source 2	170	1051206001	PA	Lurbe St Christou	43,12	0,99	303	417,0	34,2	7,35	0,3	
178	NPZ	Forage 3 Source 7	171	1051206001	PA	Lurbe St Christou	43,12	0,99	303	75,0	23,0	7,35	0,3	
179	NPZ	Forage 3 Source 6	170	1051206001	PA	Lurbe St Christou	43,12	0,99	303	366,0	44,0	7,35	0,3	
180	NPZ	Forage 3 Source 9	172	1051206001	PA	Lurbe St Christou	43,12	0,99	303	451,0	45,4	7,35	0,3	
181	NPZ	Heute Coubes	173	1051206013	Heuteu Pyrennes	Cayvern	43,12	0,99	303	451,0	45,4	7,35	0,3	
182	NPZ	Bourde Source	174	1051206013	Heuteu Pyrennes	Cayvern	43,12	0,99	303	19,1	7,40	7,40	0,4	



- 140 points $T > 45^{\circ}\text{C}$: 95 % dans la Zone Axiale
(au cœur de la chaîne : zone de socle)

Compilation des résurgences et forages hydrothermaux ($T > 15^{\circ}\text{C}$)



Ax-les-Thermes ($T_{MAX} = 76^{\circ}\text{C}$ vallée de l'Ariège)



Les Bains du Couloubret © Guillaume Payenadt

- Résurgences naturelles exploitées pour les cures thermales
- Via deux puits de pompage à 80m, $D = 95 \text{ m}^3/\text{h}$ (60 et $35 \text{ m}^3/\text{h}$)
- Le thermalisme privatise les eaux chaudes (SEMTTAX, ACQS, Eurothermes, Antea group, Chaîne Thermale du Soleil...)
- Valeautherme (BRGM pour l'Occitanie, Voirand et al 2022)

Hydrosystème de Luchon ($T_{MAX} = 72^{\circ}\text{C}$)

GÉOLOGIE

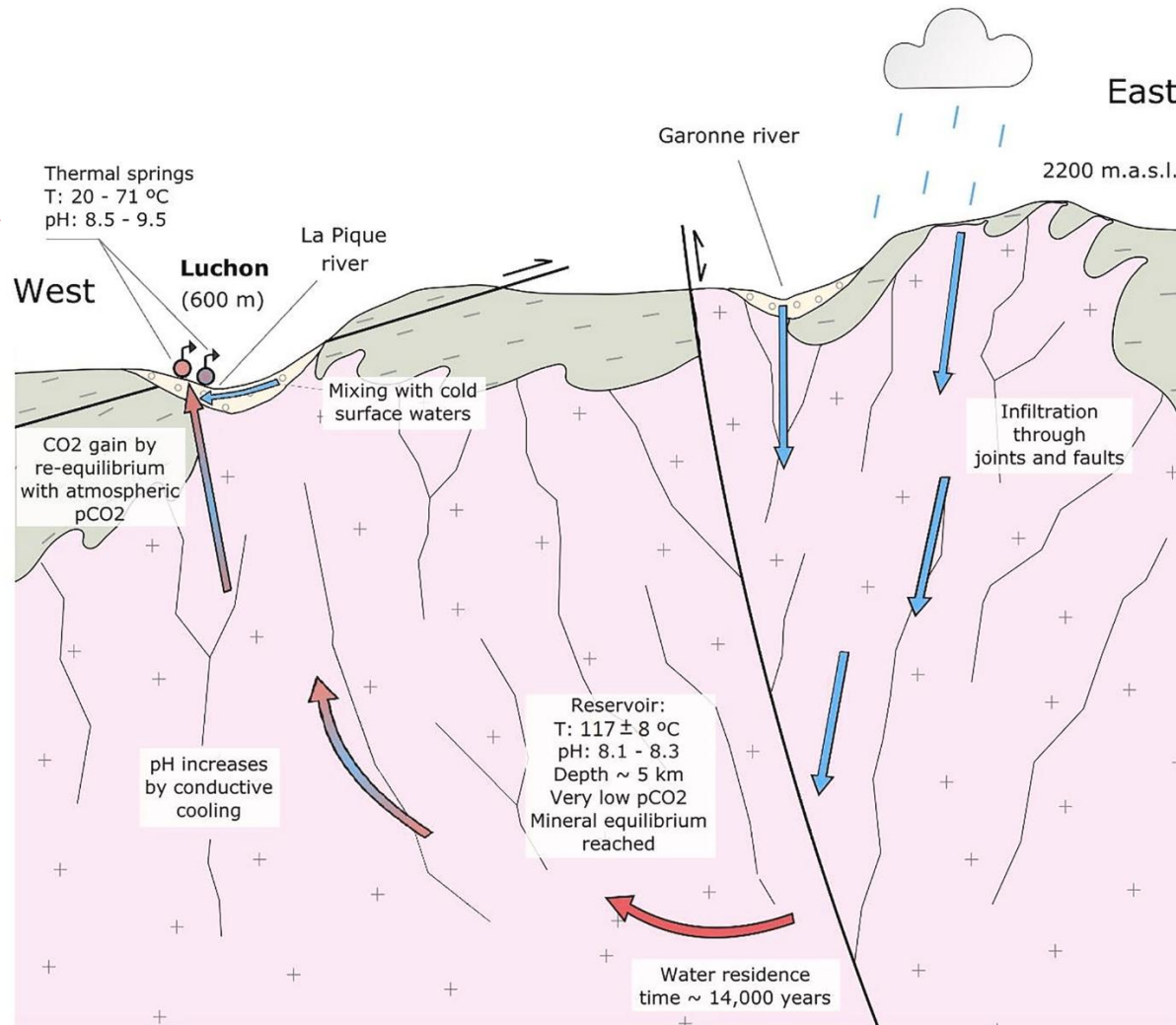
Structure 2D, 3D :

Géométrie des couches sédimentaires, des roches de socle (endogènes : magmatiques, métamorphiques)

Géométrie et rôle des failles :

- typologie
- drains ou écrans aux fluides ?
- juxtaposition unités
- position des vallées

=> Modéliser les potentiels trajets des écoulements



GÉOCHIMIE

$\delta^{18}\text{O}$: eaux météoriques, altitude des précipitations

Minéralisation : type de roches traversées, Géothermomètres $T_{PROF MAX}$, pH, Redox, Mélanges avec eaux de surface

^{14}C : âges des eaux, temps de résidence

Fig. 7. Conceptual model (not to scale) of the main hydrogeochemical features of the Luchon hydrothermal system and its evolution, according to the hydro-geochemical model developed in this work. The water residence time has been obtained from Lopoukhine and Vigouroux (1998).

Hydrosystème de Dax ($T_{MAX} = 64^{\circ}C$) : sources très salées !

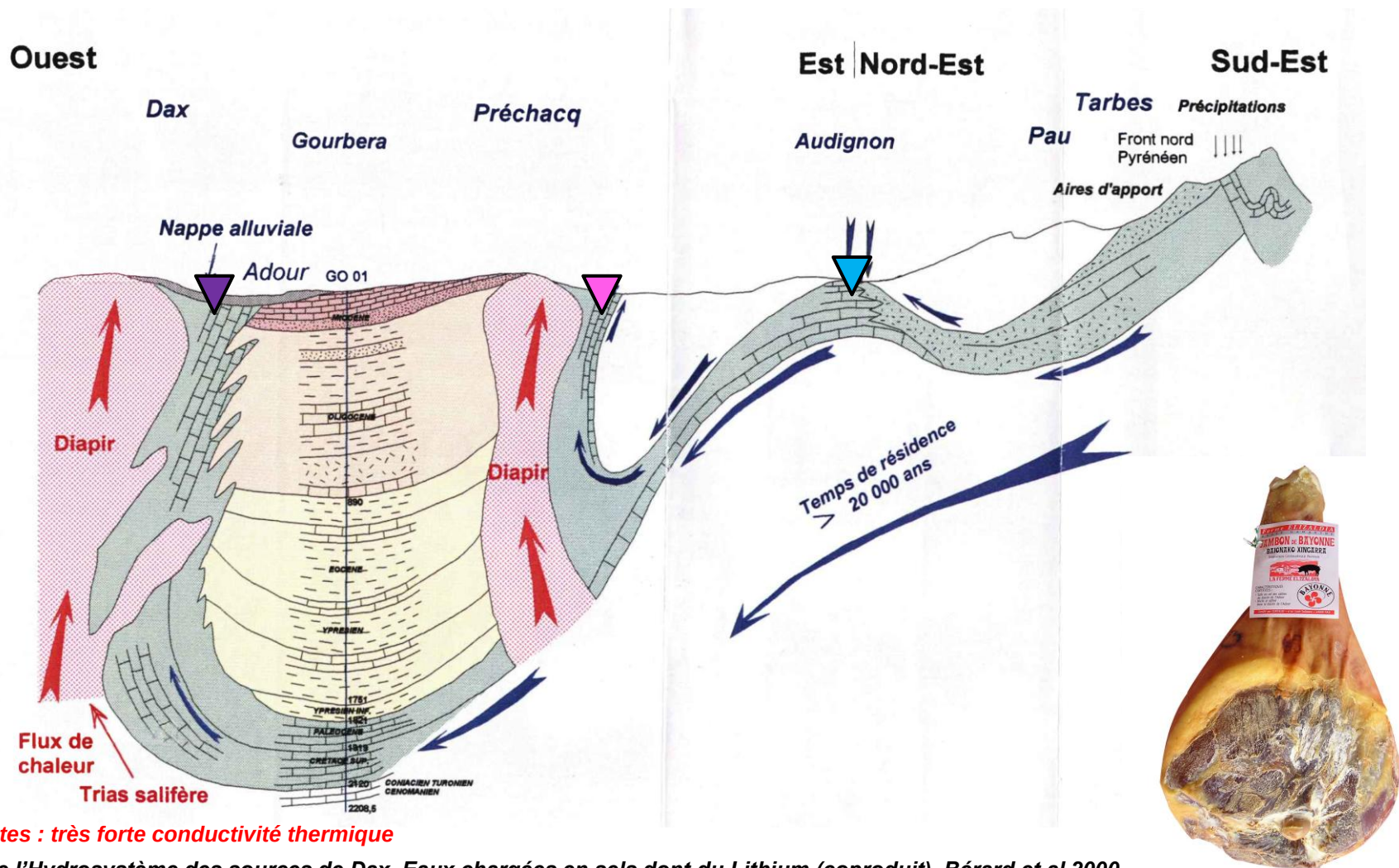
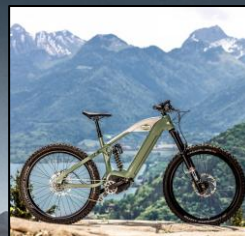
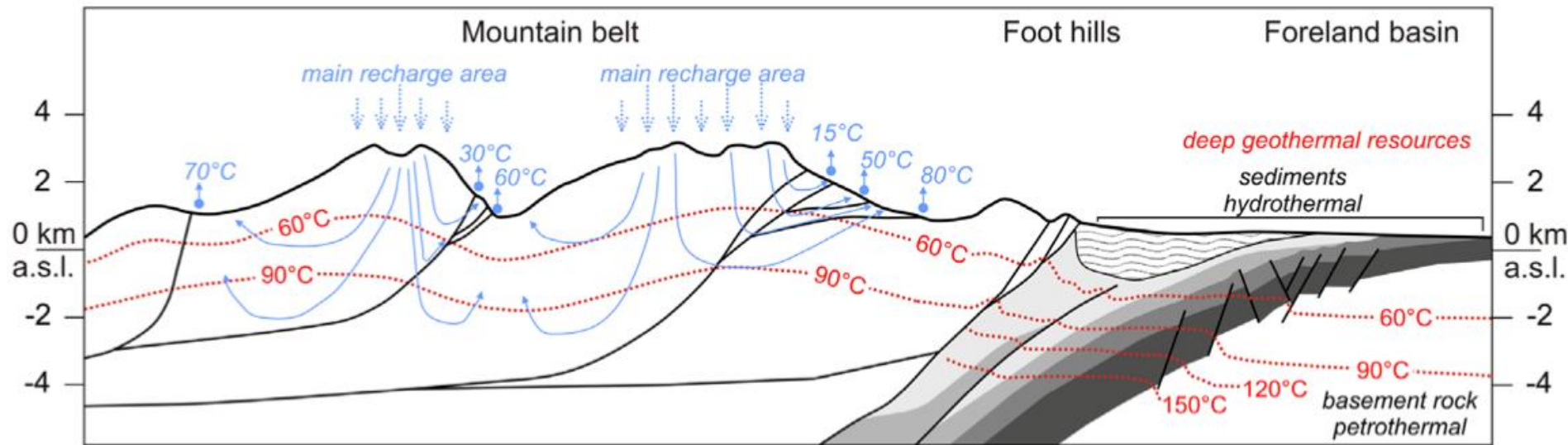


Schéma de l'Hydrosystème des sources de Dax. Eaux chargées en sels dont du Lithium (coproduit). Bérard et al 2000



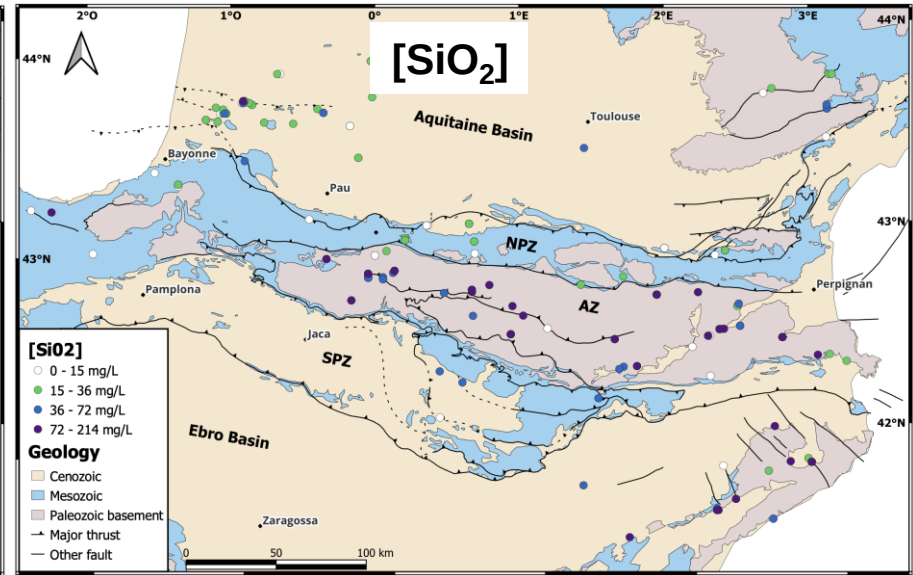
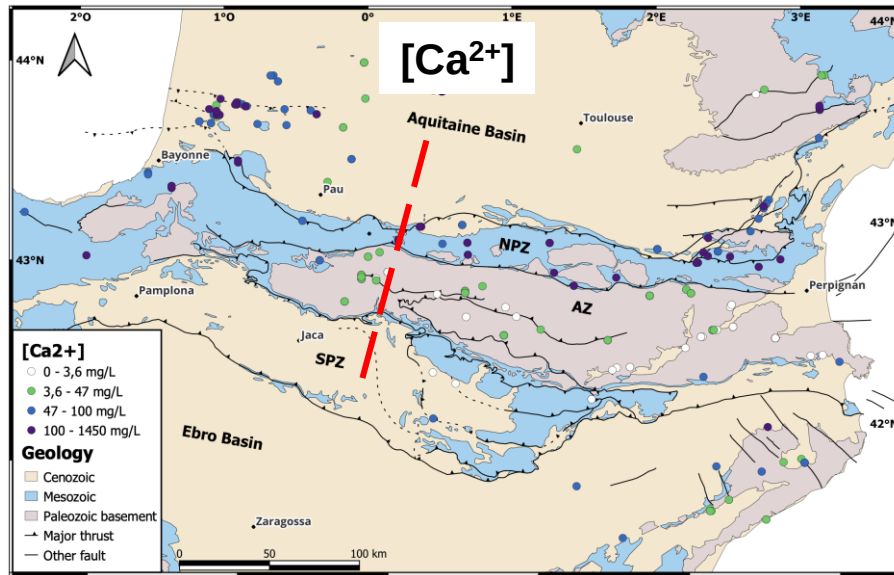
Les écoulements hydrothermaux dans une chaîne de montagnes



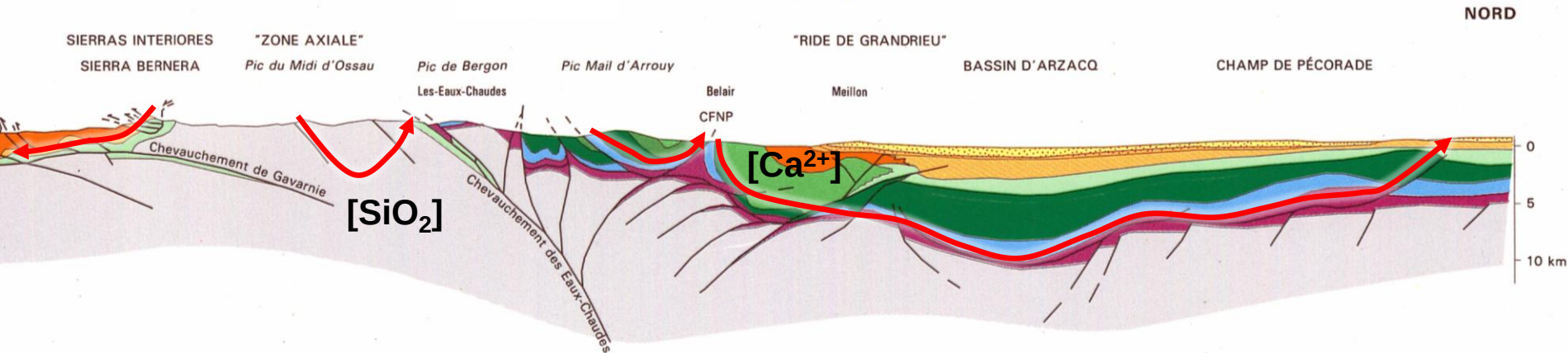
- **Système hydrothermal** : recharge - circuit - résurgence
- **Moteur** : convection libre (thermodynamique) et/ou forcée (topographie)
- **Écoulements** à travers roches perméables (porosité matricielle et fractures)
- **Source de chaleur** : gradient géothermique (profondeur $\sim 30^\circ/\text{km}$ et circulations)
- **Drains** : géométrie des roches perméables (couches sédimentaires, fracturation, **rôle des failles, dont les failles actives ?**)

Moech 2014 Geothermal play type : orogenic belt

Structure générale de l'hydrosystème : écoulements stéréotypés

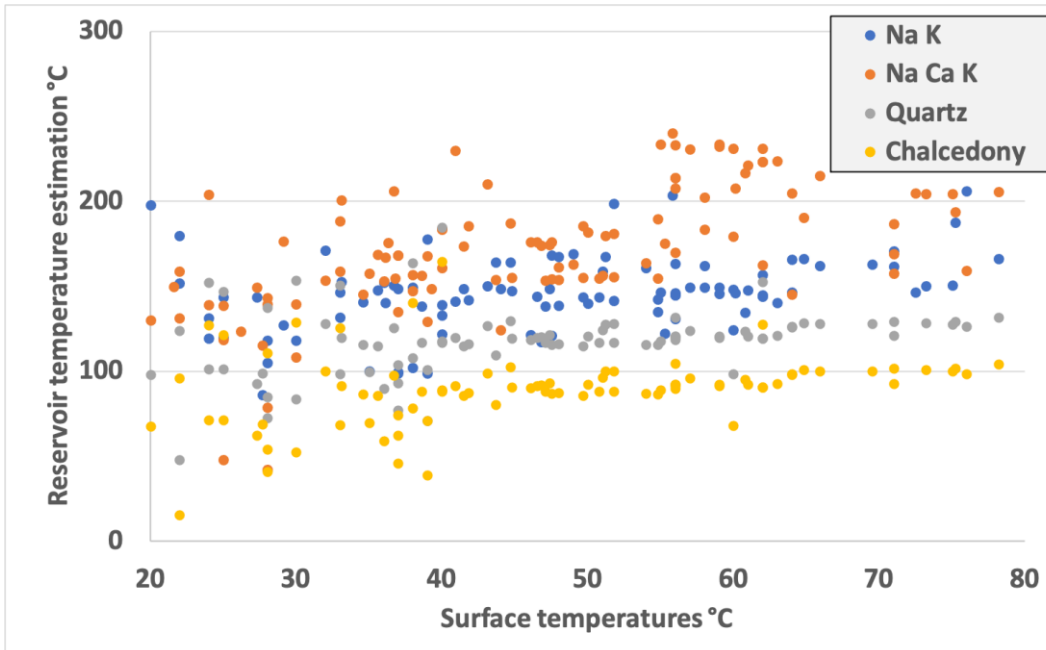
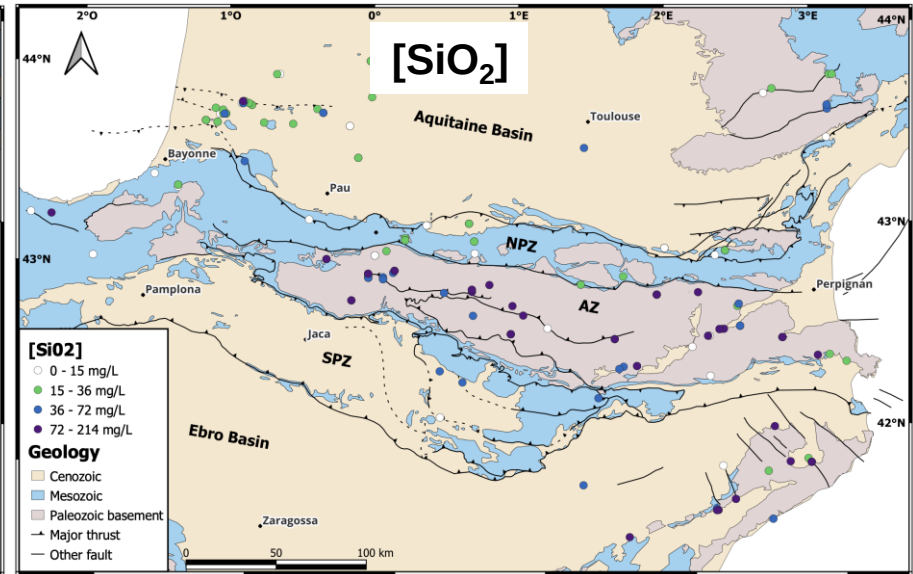
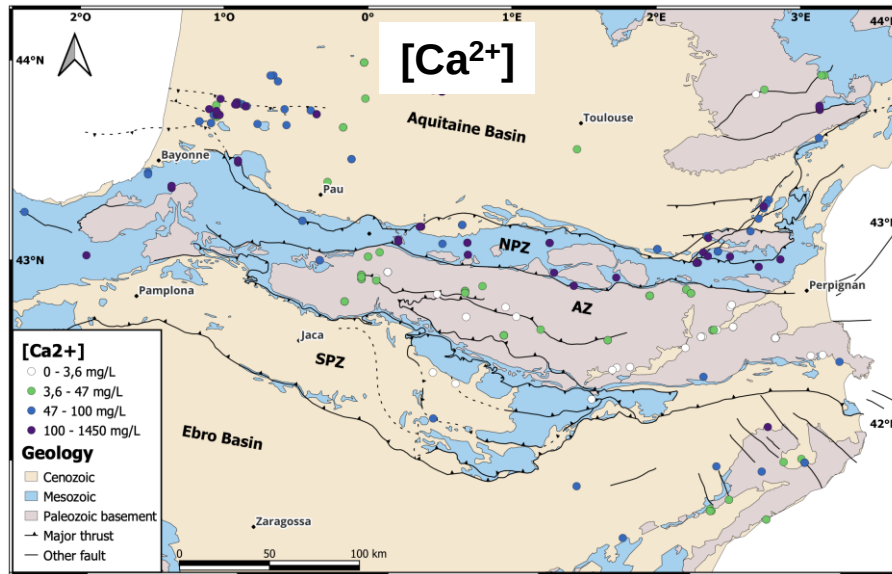


Soliva et Eude 2024 Géologues ; Eude in prep ; Soliva, Eude et al in prep.



Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées. BRGM – AGSO 2018

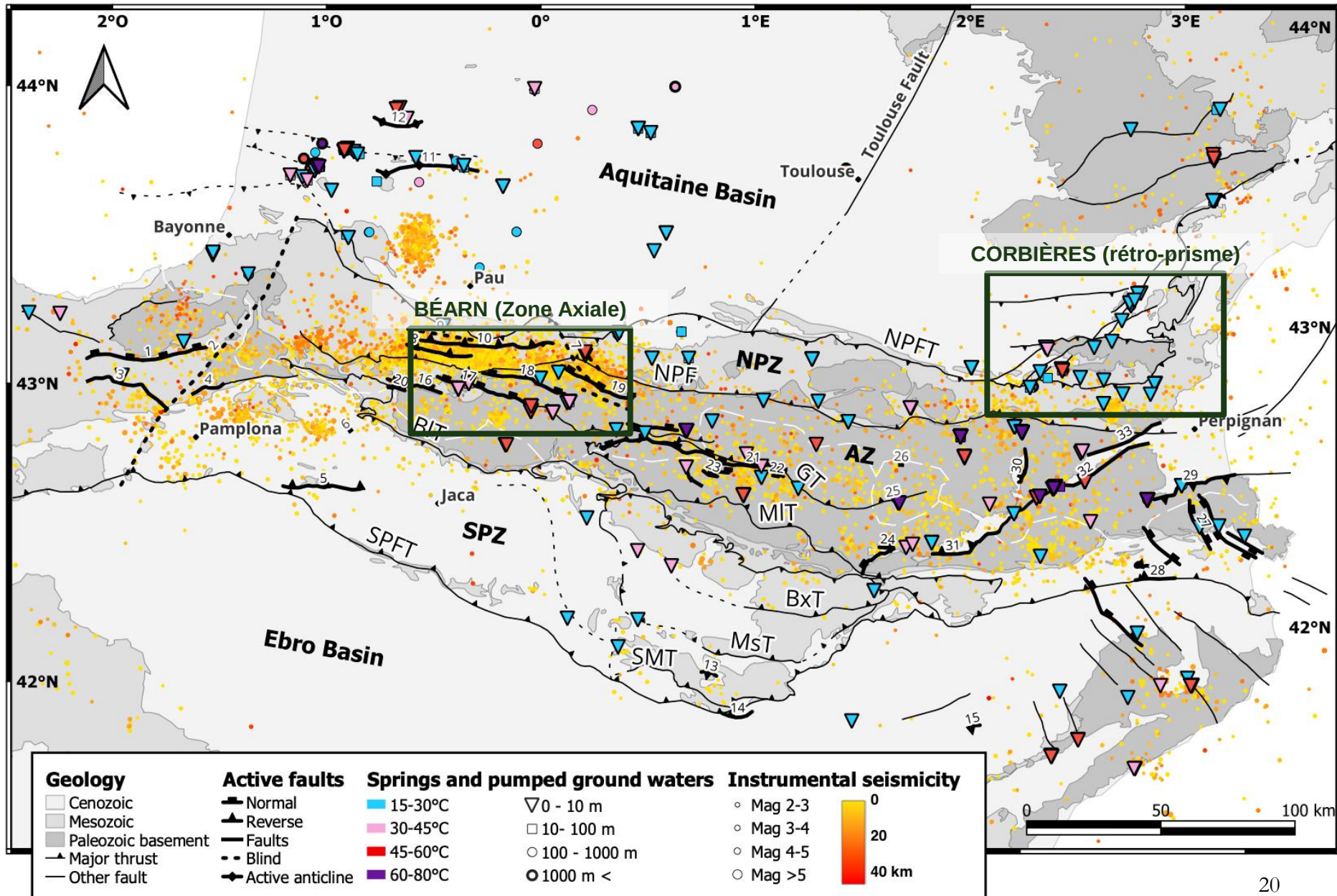
Structure générale de l'hydrosystème et potentiel géothermique



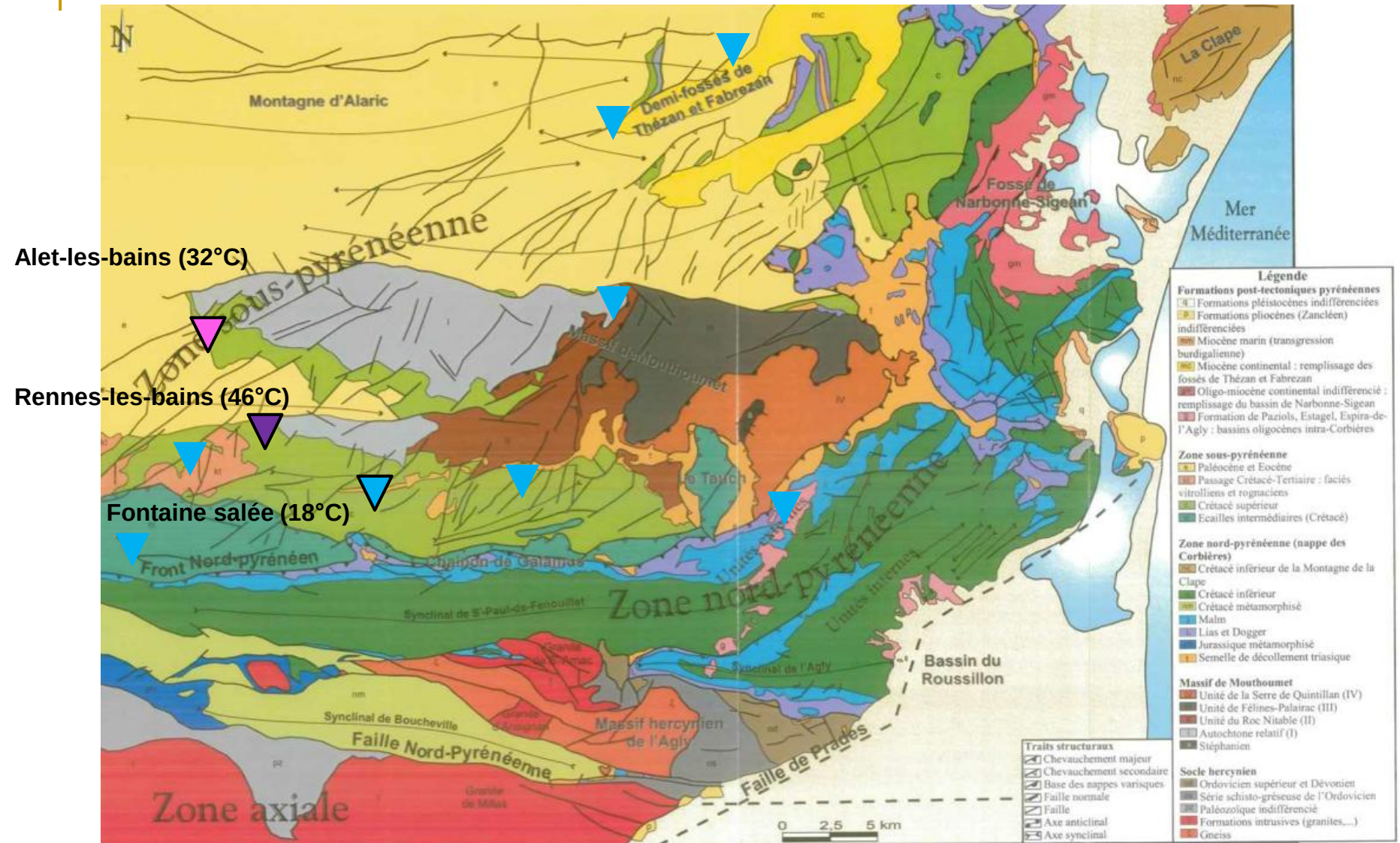
Résultats des géothermomètres classiques :

- $T_{\text{réservoir}} = [90 - 200 \text{ °C}]$
- **Potentiel fort, sous-exploité.**
- Perspectives de modélisations géothermométriques.
- Drains ascendants ?
- Localisation des résurgences ?

Tectonique active et localisation des résurgences

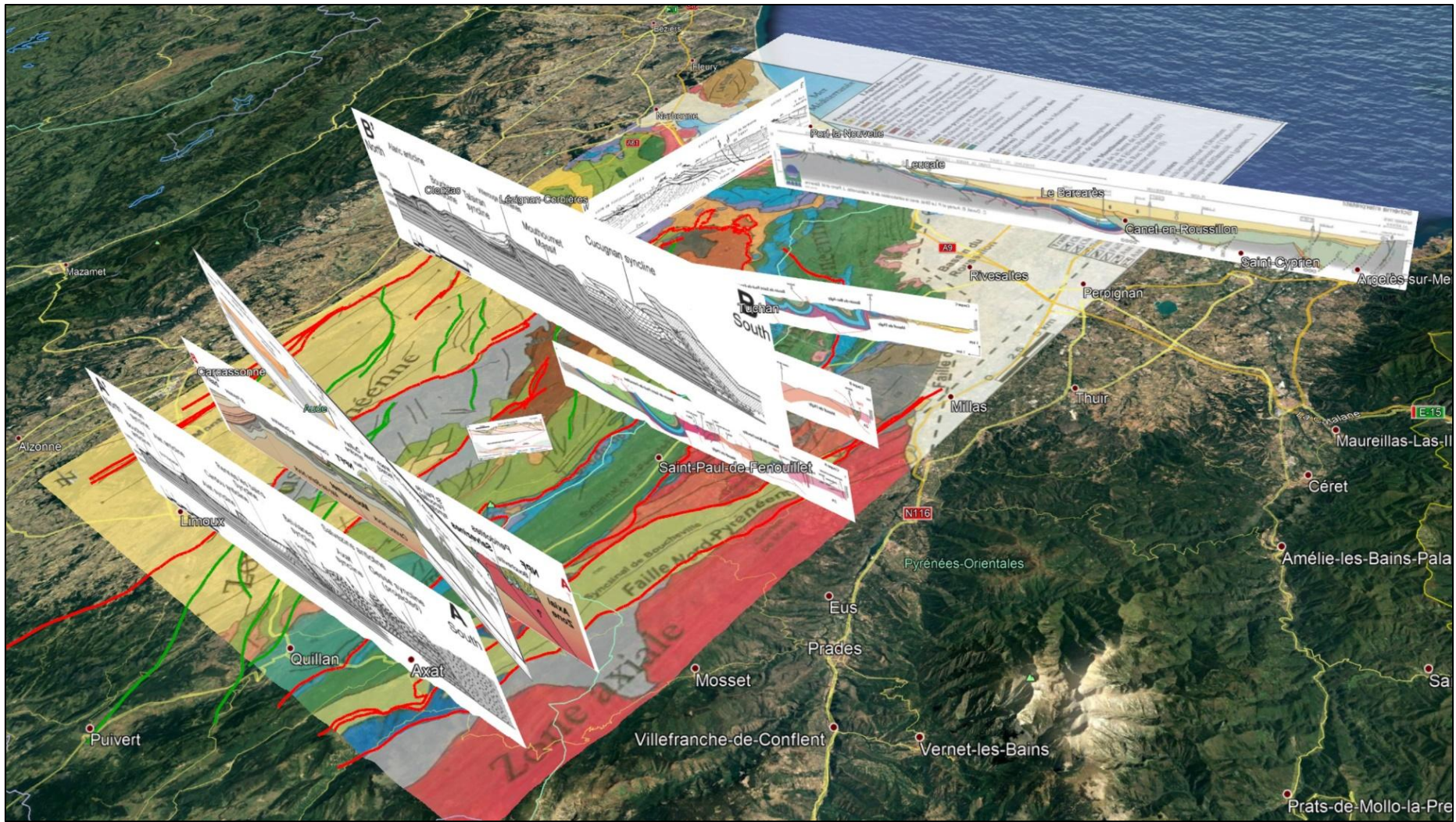


Géologie des Corbières : failles, massif de Mouthoumet, sources



La Géothermie – à l'échelle des Pyrénées – des Corbières – du Béarn

Synthèse bibliographique de la structure des Corbières



Synthèse litho-stratigraphique : types, âges, épaisseurs strates

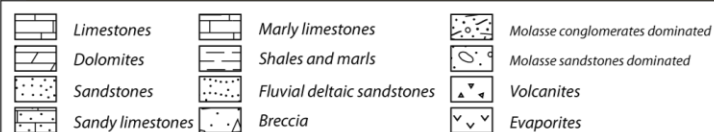
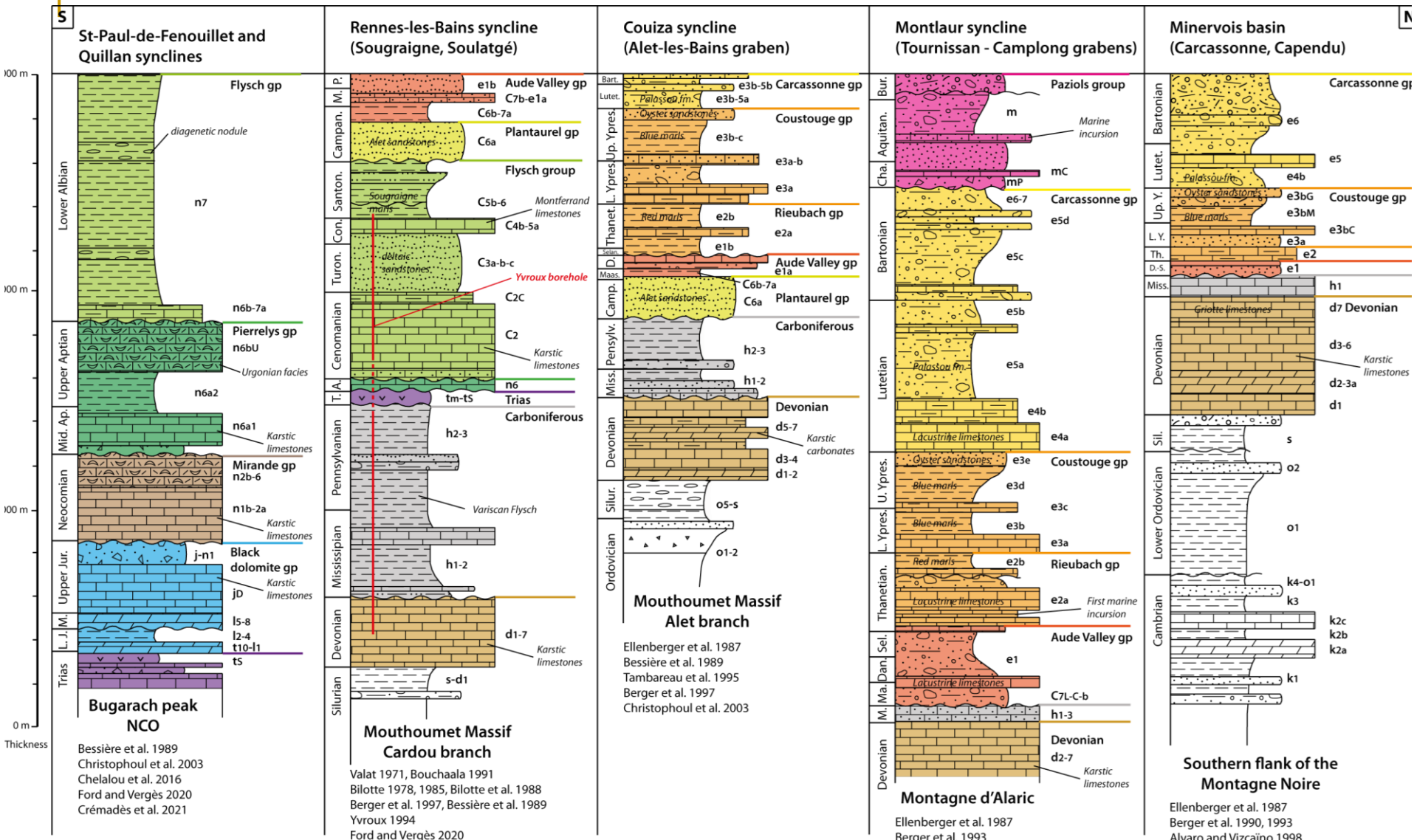
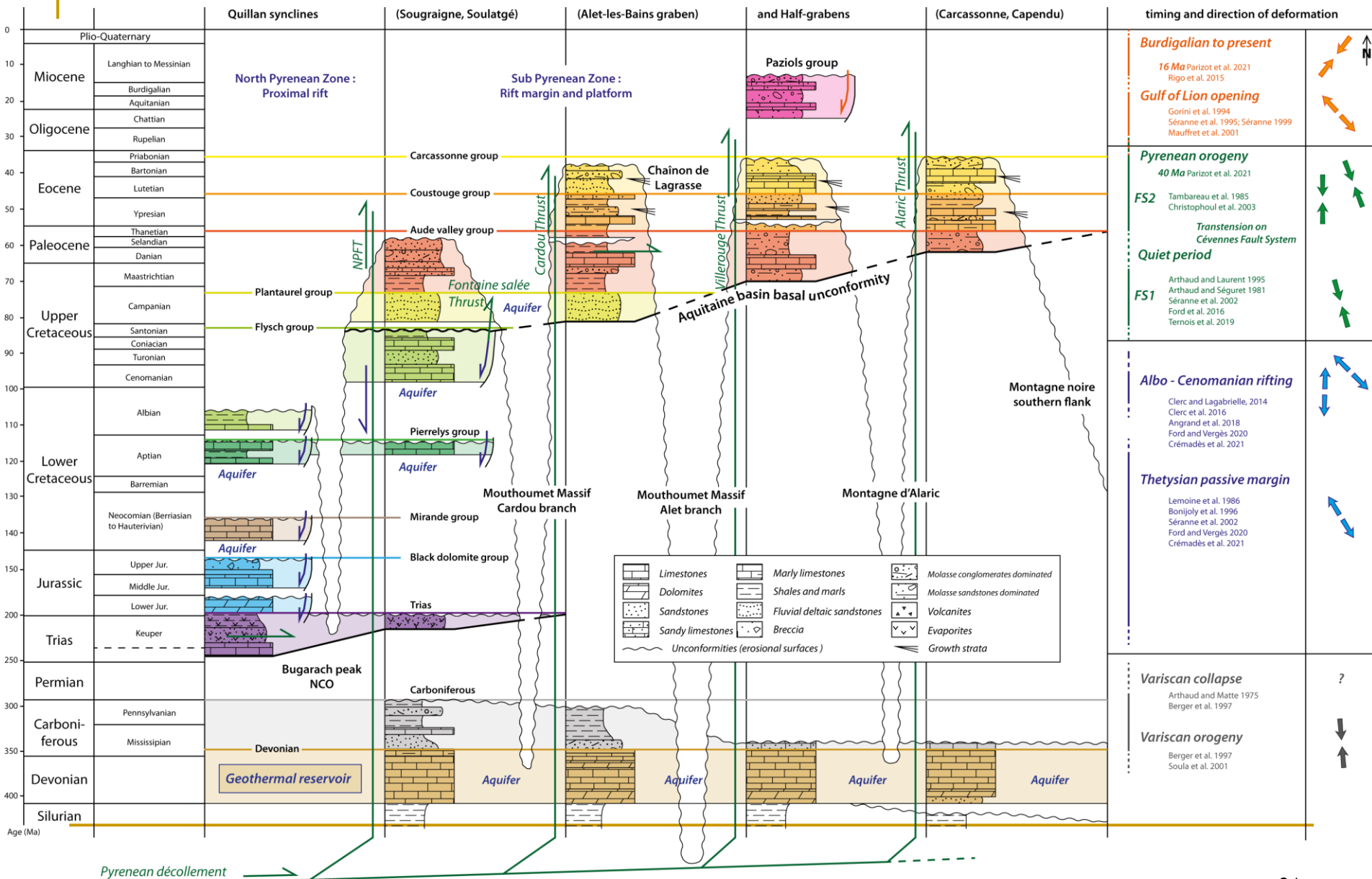
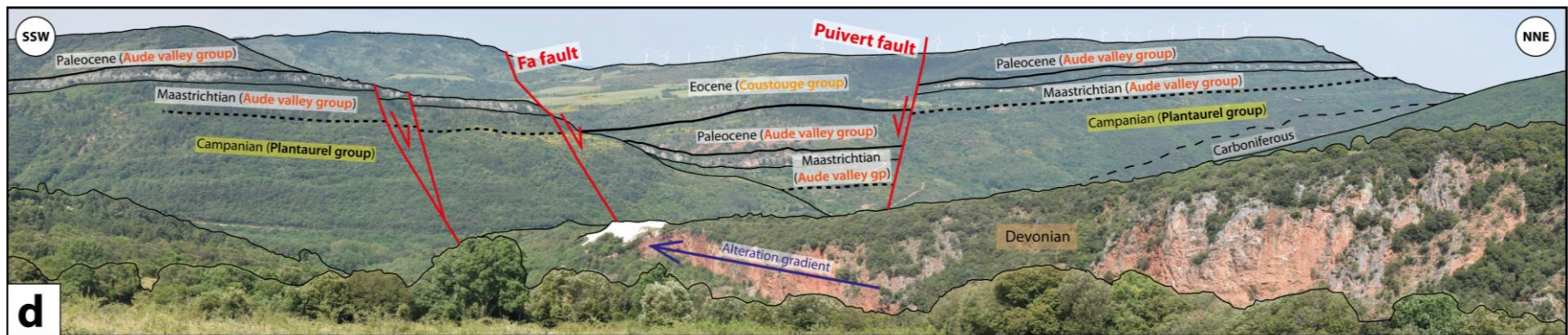
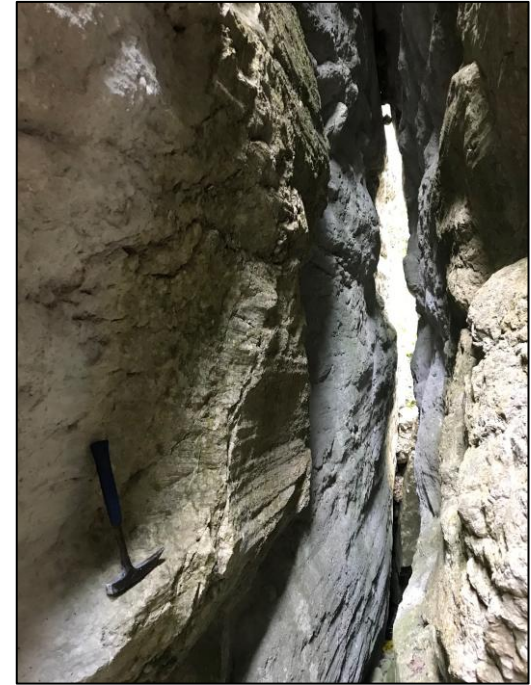
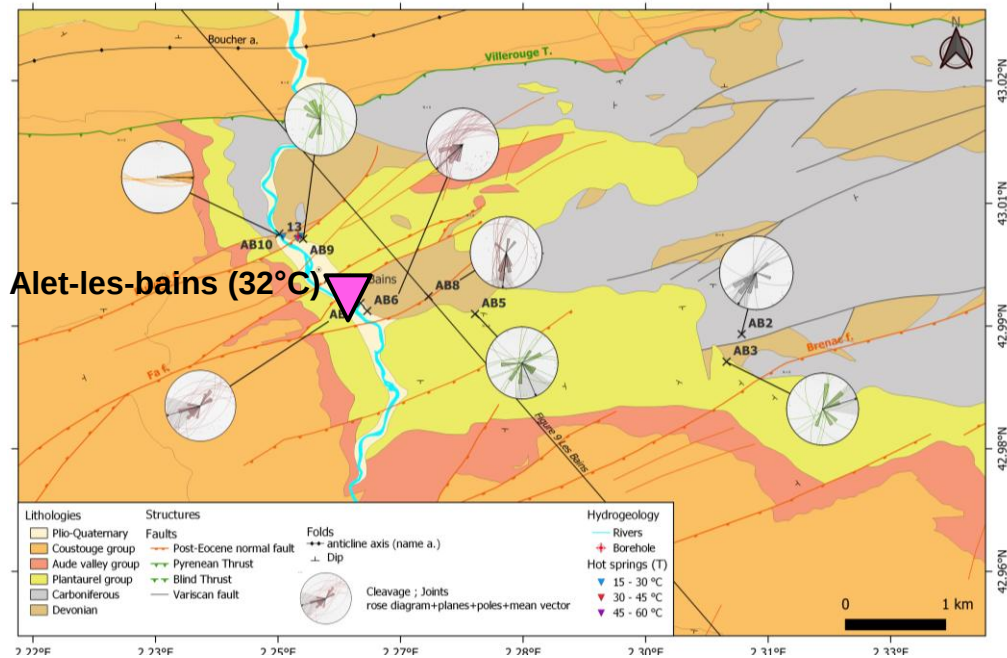


Diagramme chrono-stratigraphique : lien tectonique-sédim.

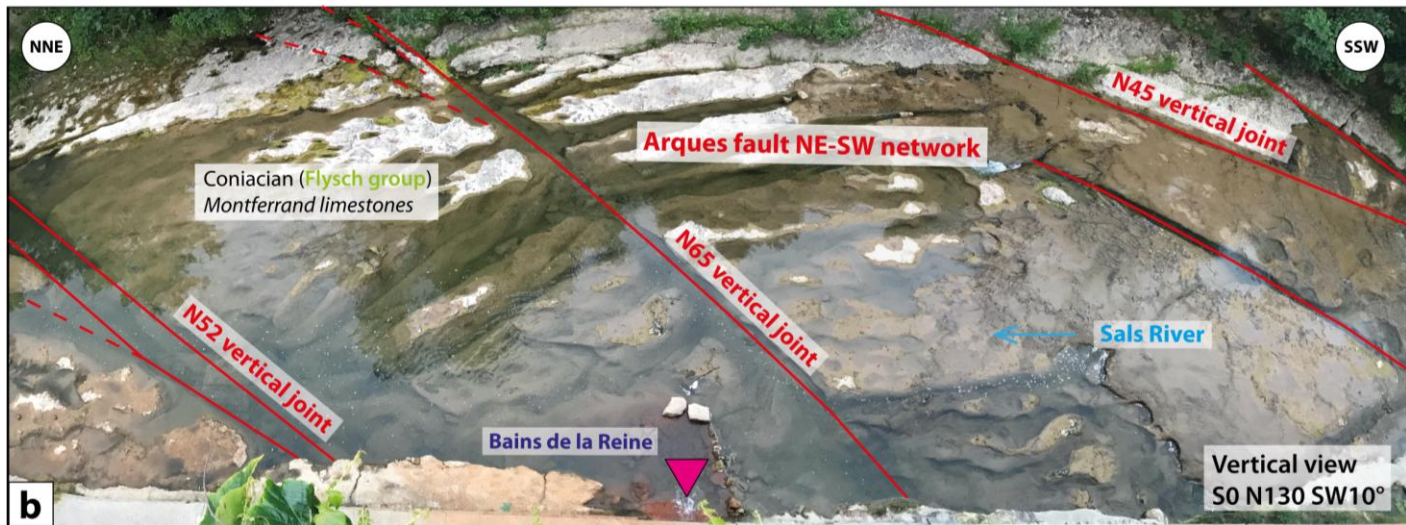
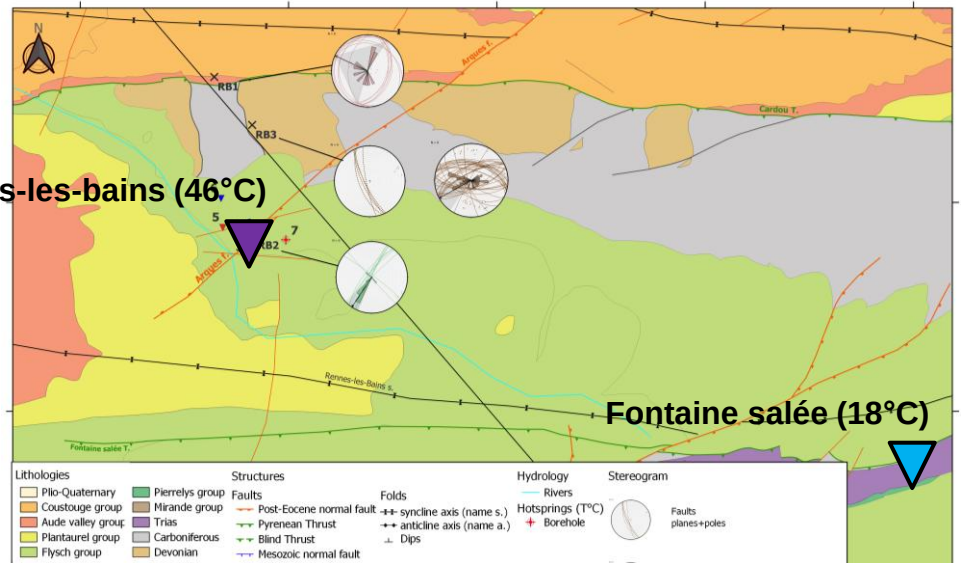


Géologie structurale de terrain : typologie failles, perméabilité...

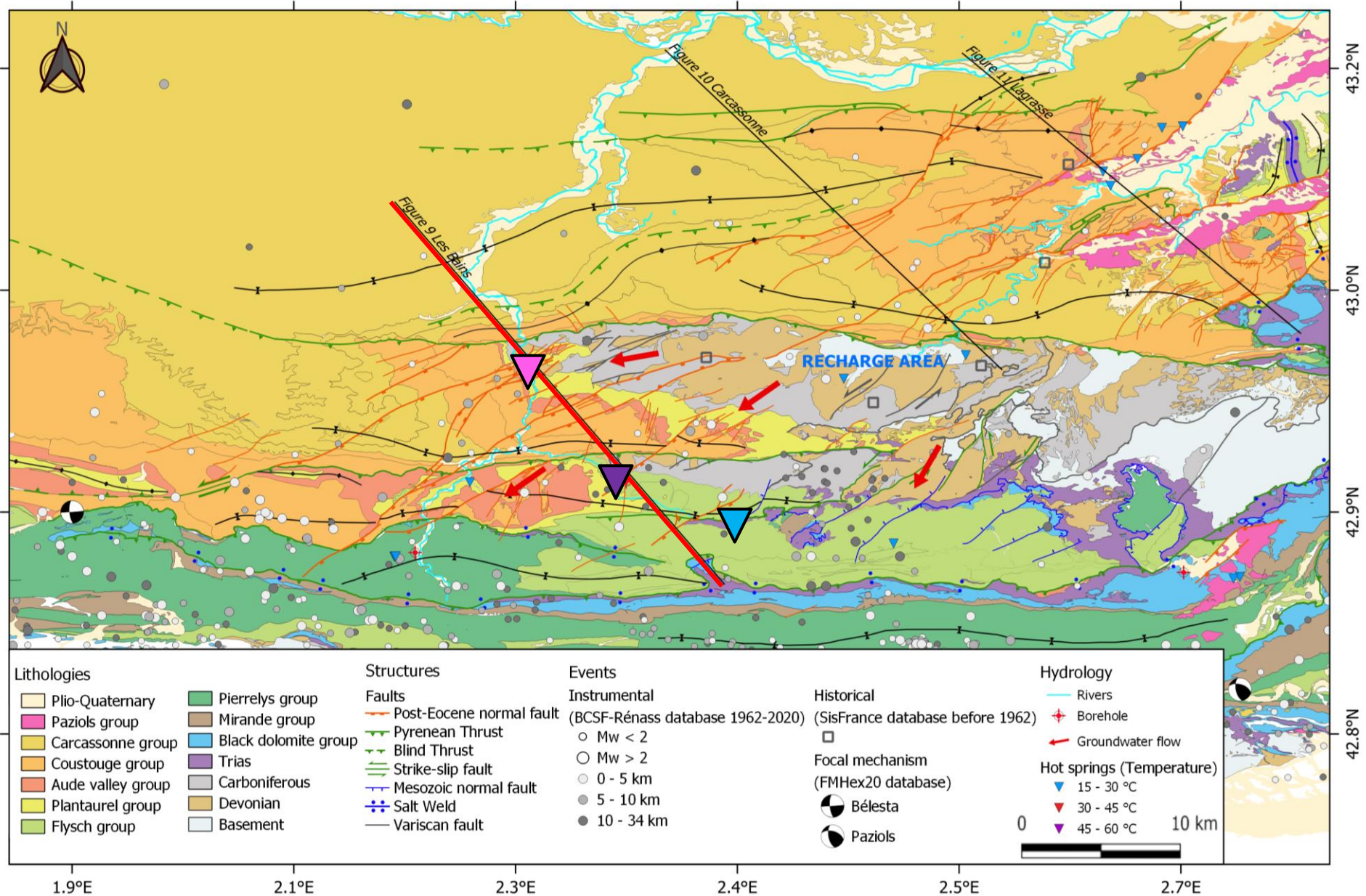


La Géothermie – à l'échelle des Pyrénées – des Corbières – du Béarn

Résurgences de Rennes-les-Bains et Fontaine salée (saumures)

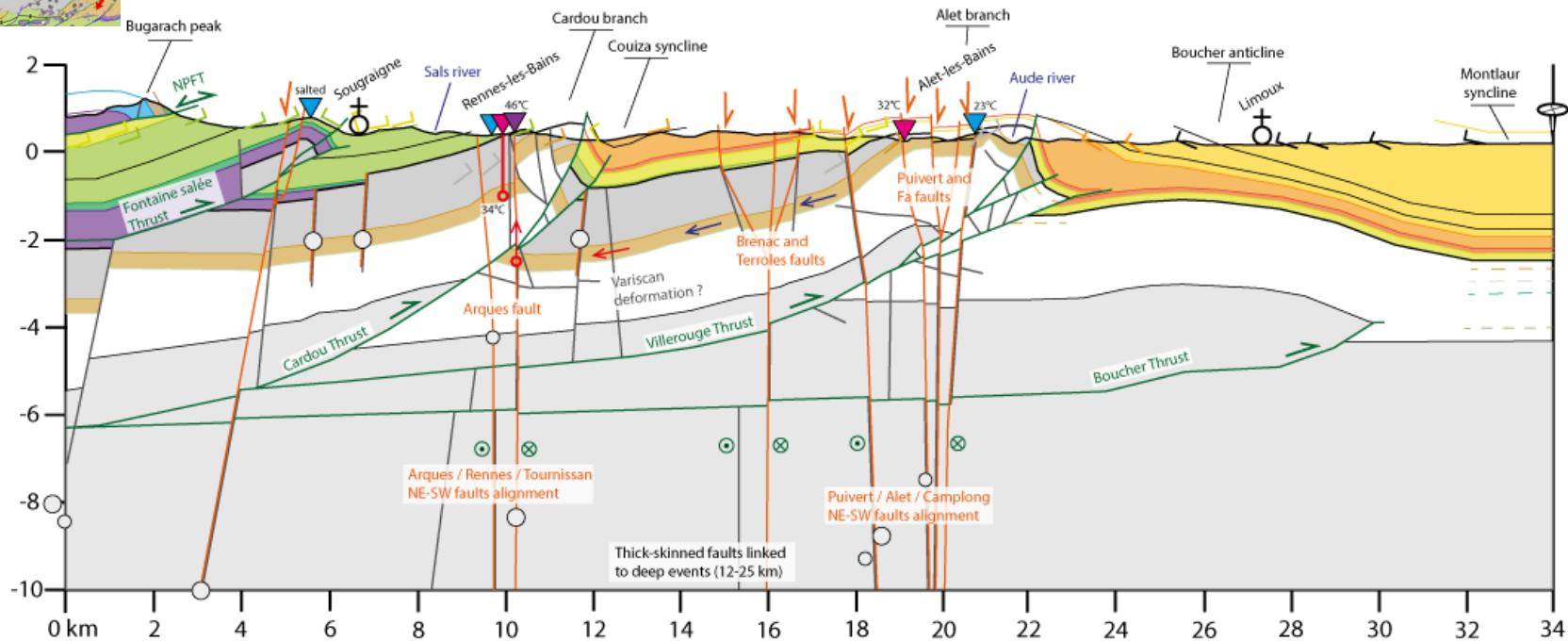


Hydrosystème des Corbières : sismicité, écoulements, coupes



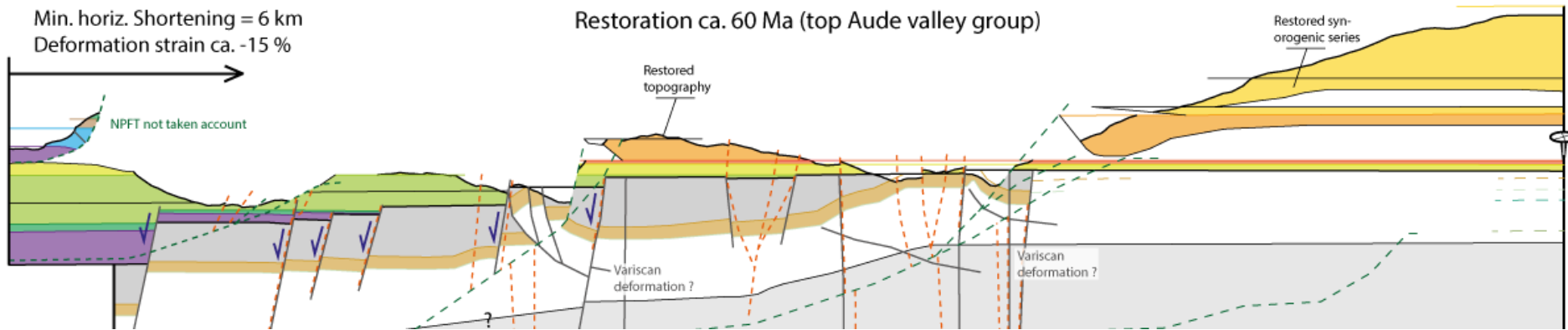
Hydrosystème vu en coupe équilibrée

NW



Min. horiz. Shortening = 6 km
Deformation strain ca. -15 %

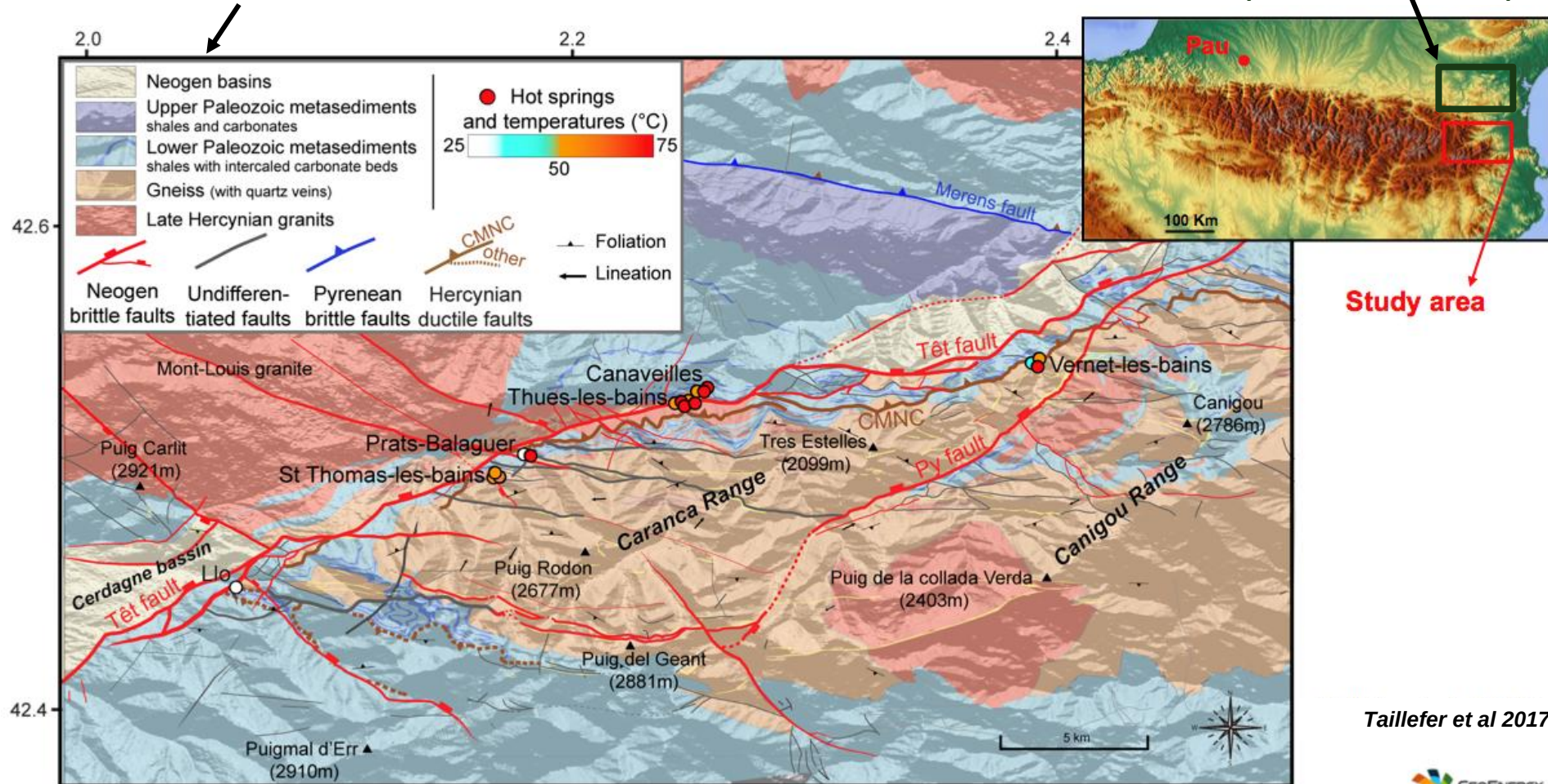
Restoration ca. 60 Ma (top Aude valley group)



Résurgences de la vallée de Têt : alignées sur une faille active

Roches endogènes

CORBIÈRES (Roches sédimentaires)



Study area

Taillefer et al 2017

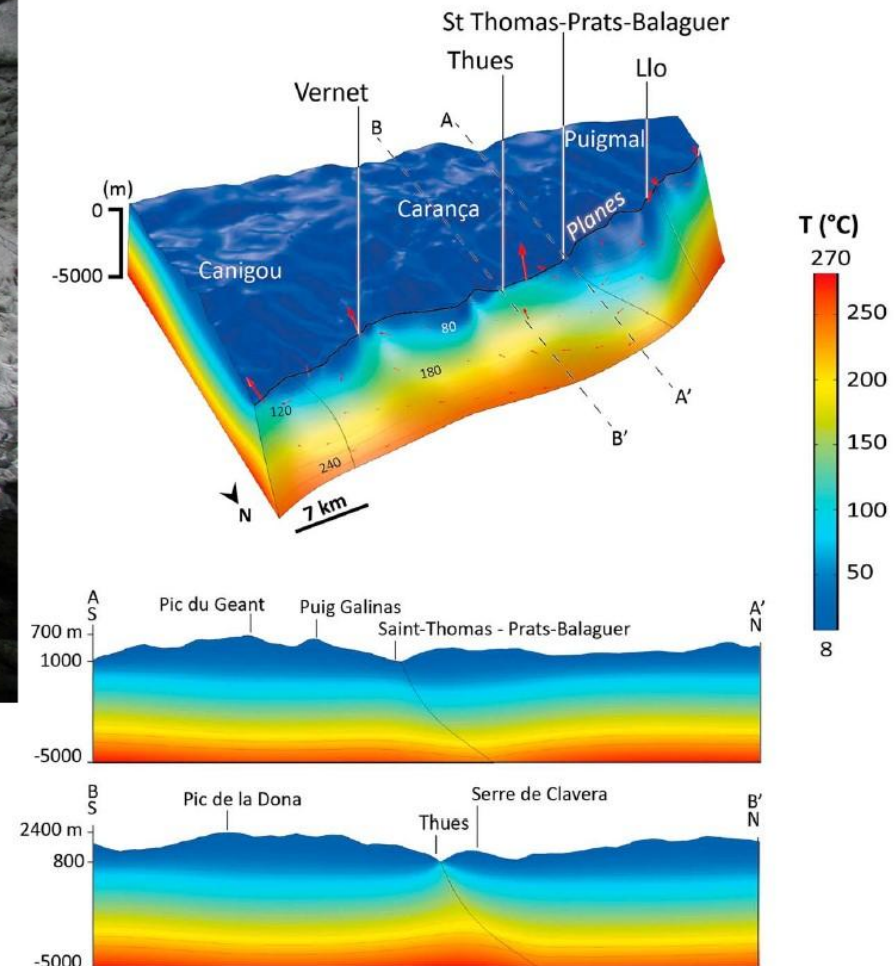


Modélisation numérique des écoulements de la faille de la Têt



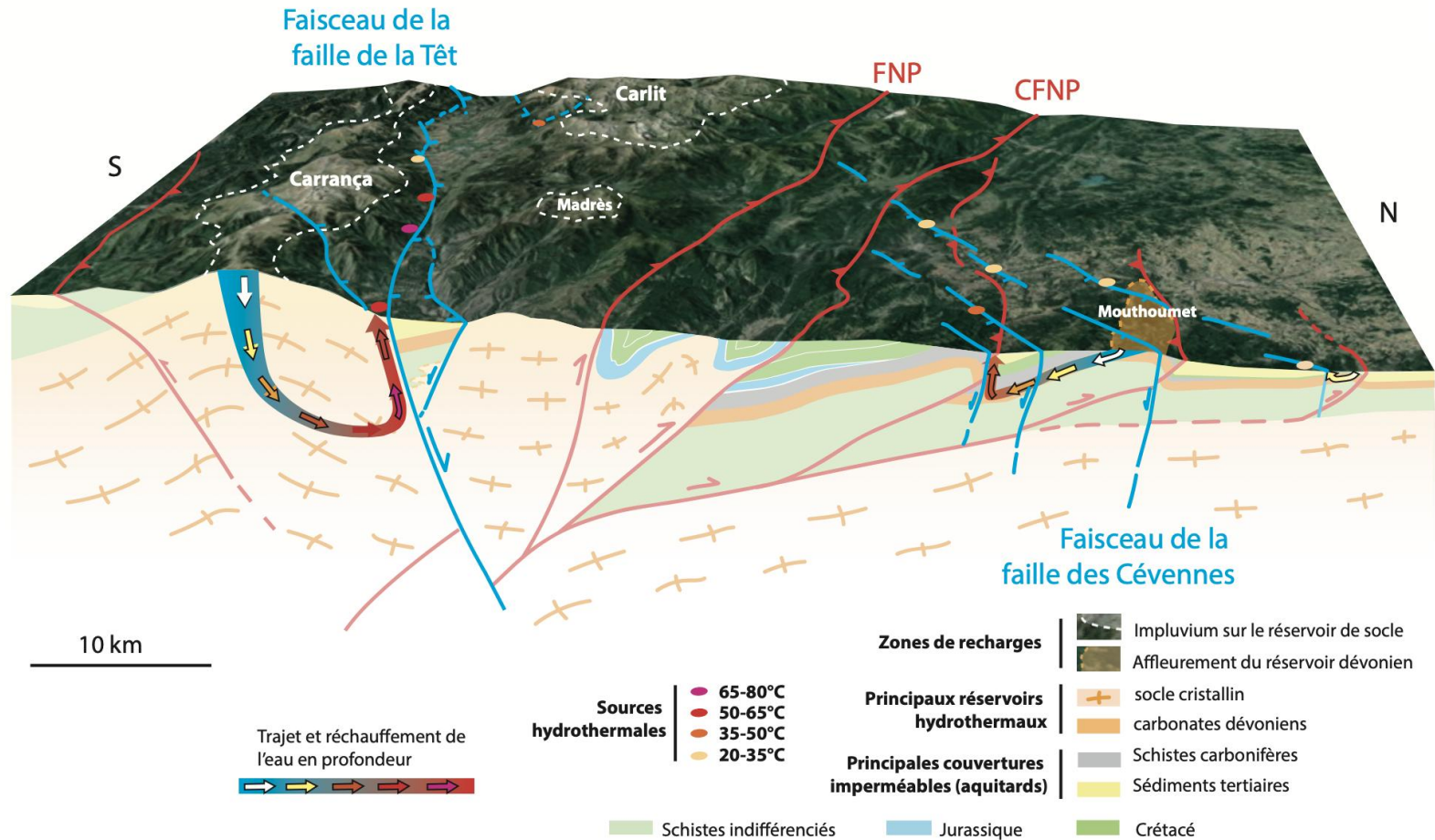
Illustration 10 – Source thermale dite “des bains” de Canaveilles

- Remontées des eaux thermales par la faille
- Perturbation locale du géotherme
- Parfois une résurgence mais pas toujours : **gisement géothermal aveugle**



Taillefer et al 2018 ; Milesi et al 2019, 2020

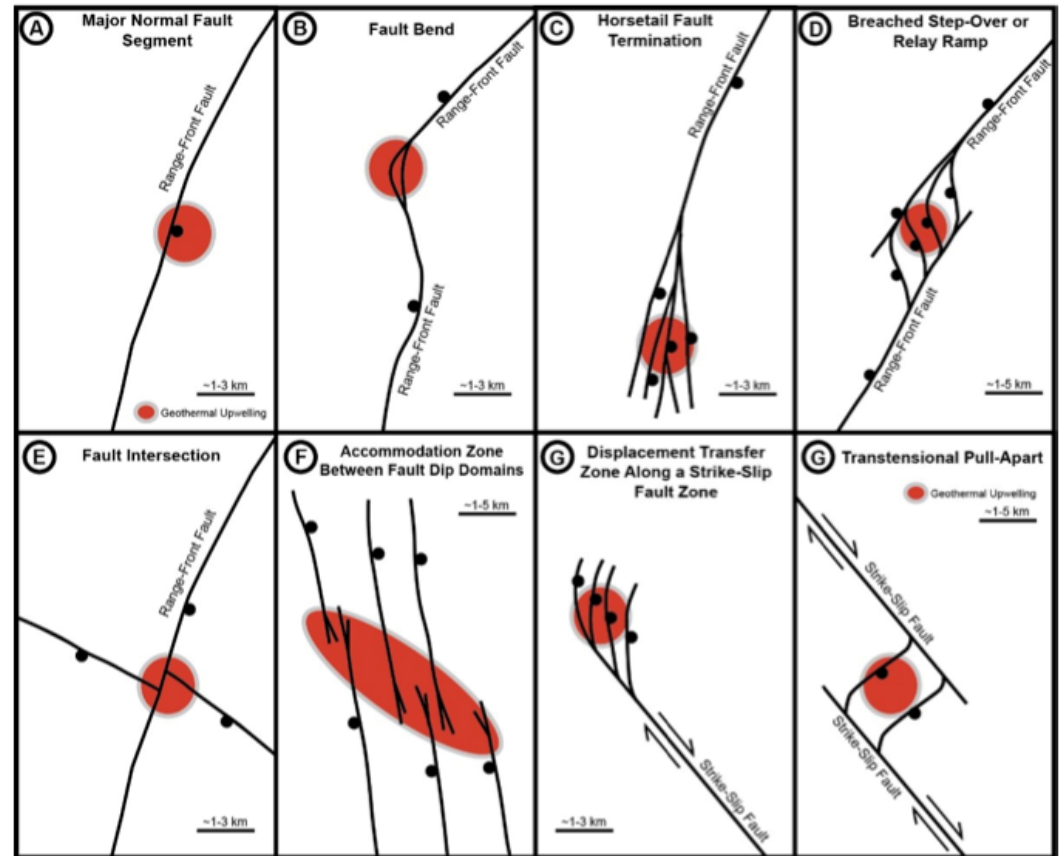
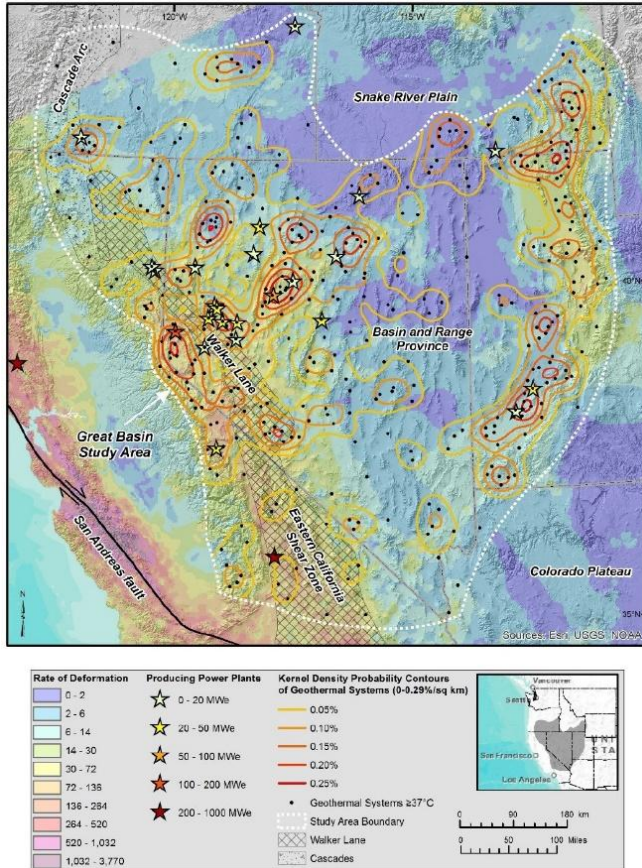
Rôles des failles actives dans l'est des Pyrénées



- Guident les écoulements hydrothermaux ascendants...
- ...donc la localisation de résurgences.
- Perturbent localement le géotherme.

=> Cibles géothermales !

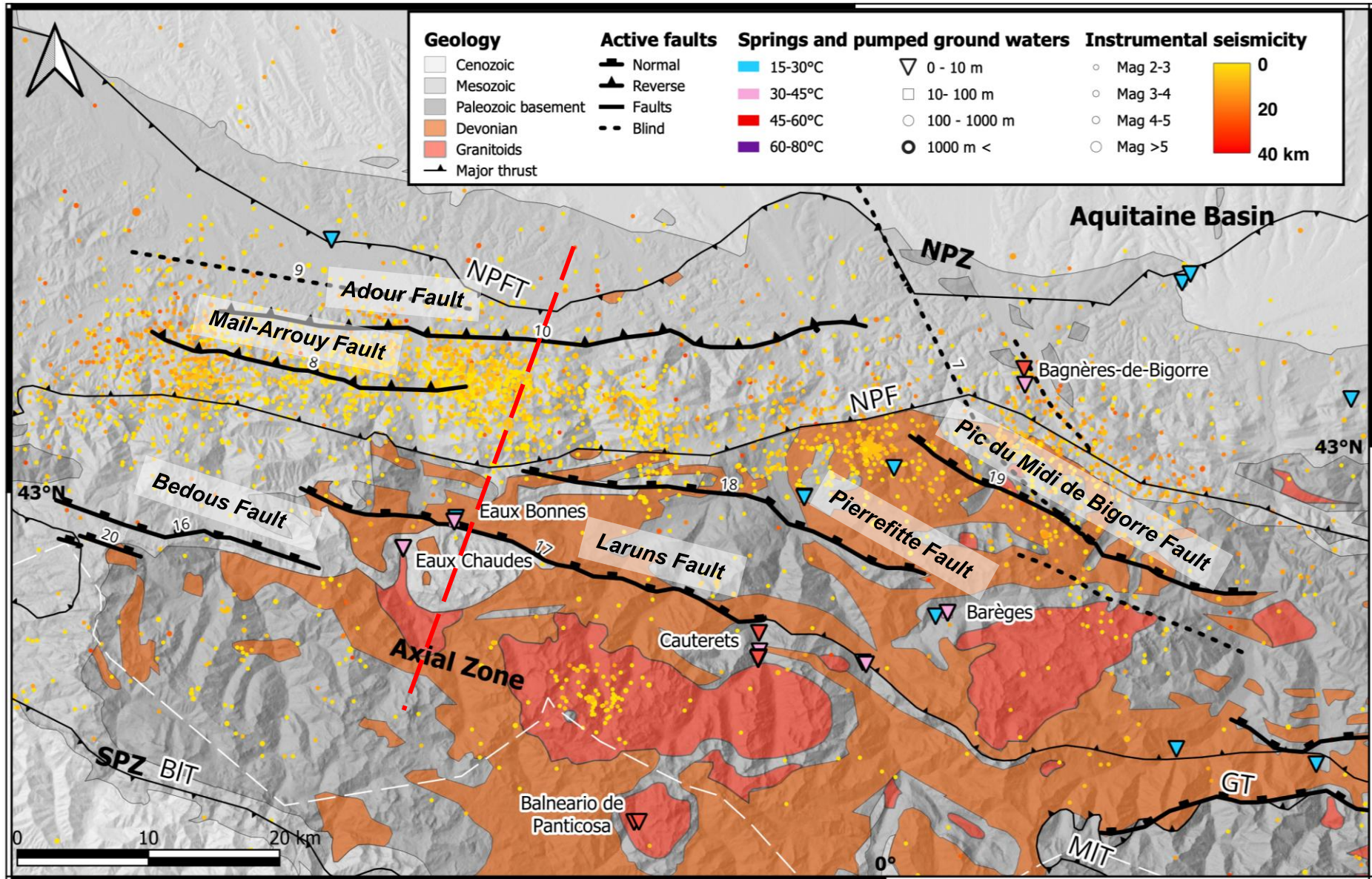
Cibles tectoniques pour la géothermie et gisements aveugles



Étude statistique des champs producteurs dans le Great basin US - Faulds et Hinz 2015 GWCT

- Écoulements hydrothermaux ascendants aux coudes, extrémités, intersections, zones relais de failles
- Failles peuvent être perméables, forment des creux topographiques, juxtaposent des unités.

Localisation des résurgences ?



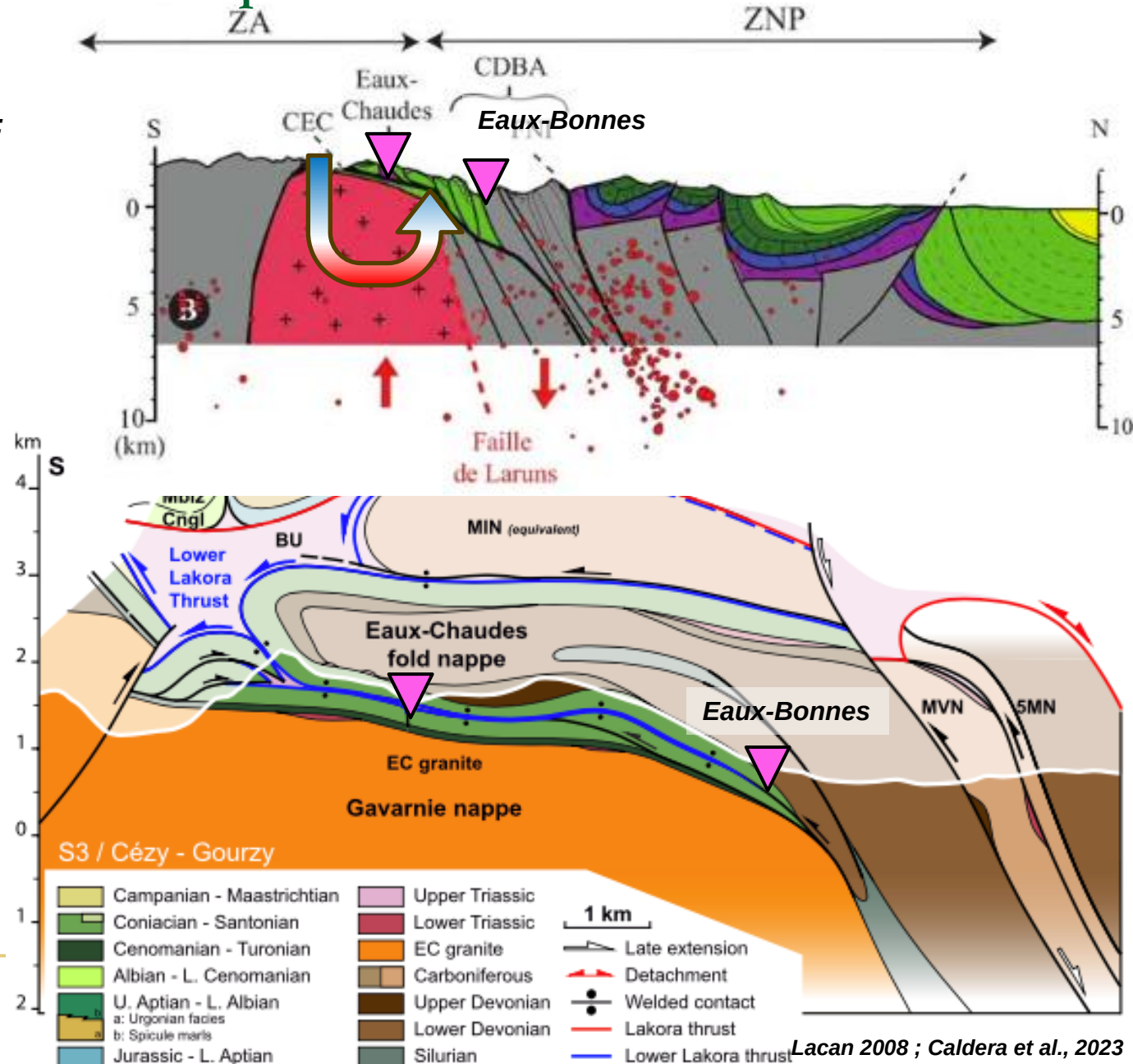
Circulations liées à l'escarpement de Laruns ?

Eaux-Chaudes et Eaux-Bonnes :

- $T_{MAX} = 36 - 44 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $T_{réservoir} = 120 - 160 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $Z_{MAX} = 4 - 6 \text{ km}$

HYDROSYSTÈME SUR COUPES DE LA VALLÉE d'OSSAU :

- Recharge grâce au réservoir affleurant
- Écoulements dans granodiorite (EC granite) fracturés
- Températures acquises en profondeur
- Remontées liées aux failles actives ?
- Résurgences localisées aux contacts anormaux ? dans les vallées ?
- Système mixte (endogène, sédimentaire)



Perspectives de travaux autour de Laruns : drone thermique, terrain, analyses eaux...

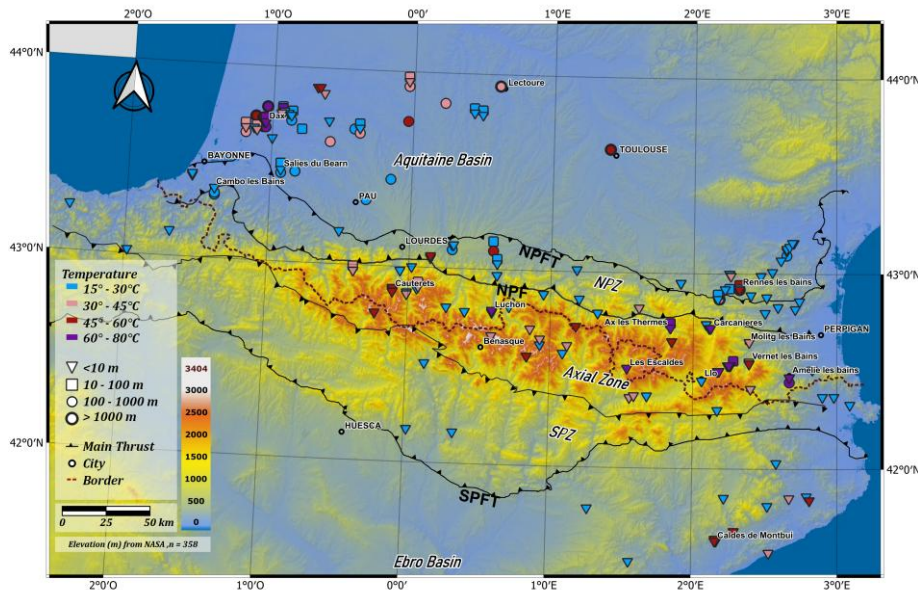
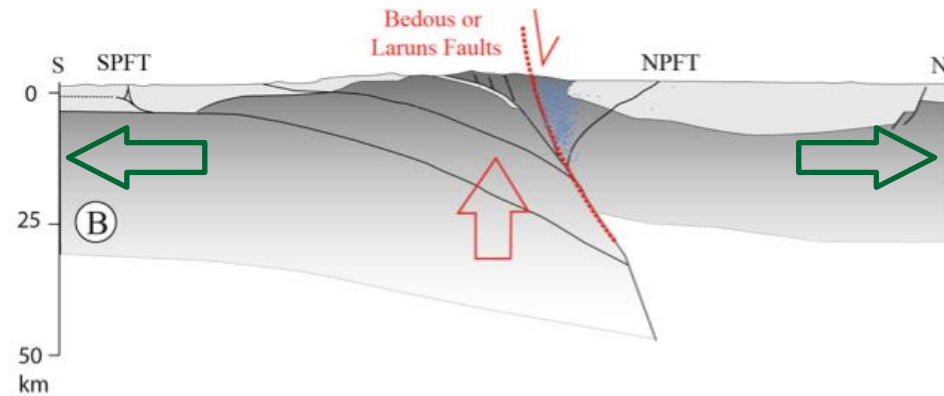


Eaux-Bonnes vue de drone © François Teste

La géothermie dans les Pyrénées

- Sous-exploitée ?
- Fort potentiel énergétique.
- Liée aux nombreuses failles actives

Les Pyrénées sont en train de s'écrouler : régime tectonique principalement extensif, ajustement isostatique.



La géothermie est une énergie :

- continue (non-intermittente),
- capable de produire du chaud, du froid,
- des coproduits comme le lithium,
- qui permet le stockage d'énergie,
- à faible empreinte de surface.

Merci !