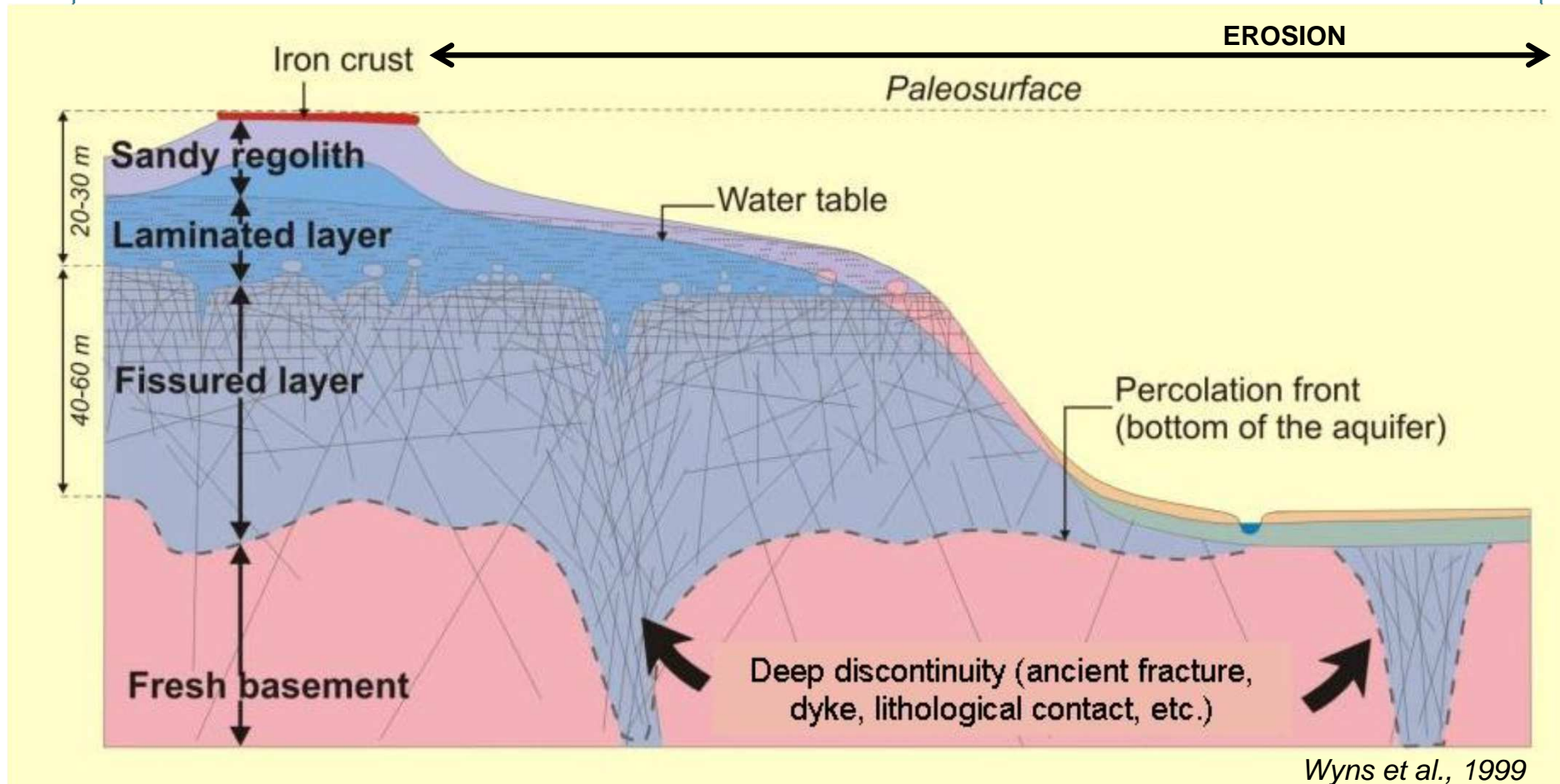




# Structure des aquifères de socle

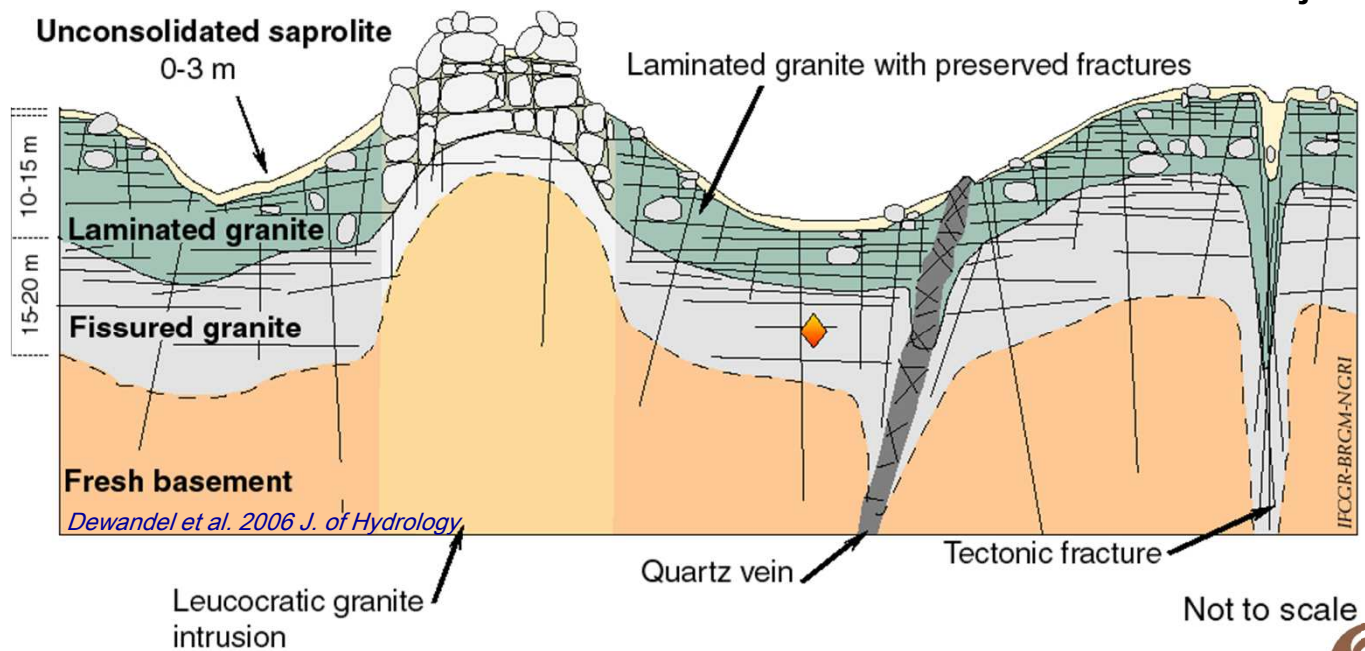
## Le concept d'aquifère stratiforme



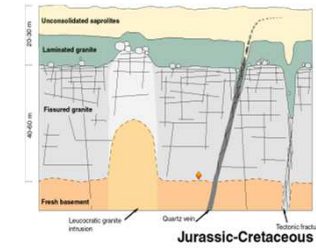
- Aquifère composé de 2 horizons principaux :
- saprolite (non consolidée) : rôle capacitif
  - un horizon fissuré: rôle transmissif & capacitif

En Inde du sud:  
profil d'altération polyphasé contrôlé par l'histoire  
géodynamique de la péninsule indienne

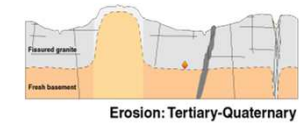
***South India:  
multiphase weathered profile***



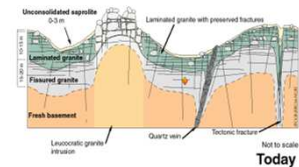
195-65 Ma



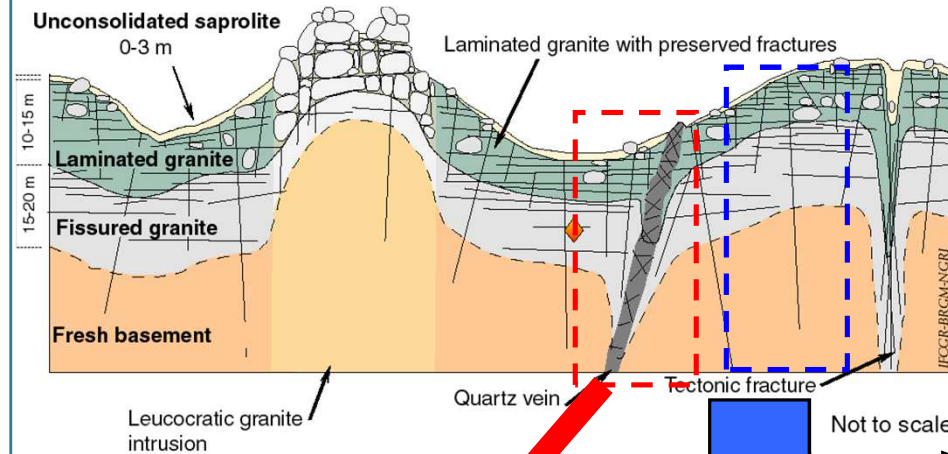
50 Ma



Aujurd'hui

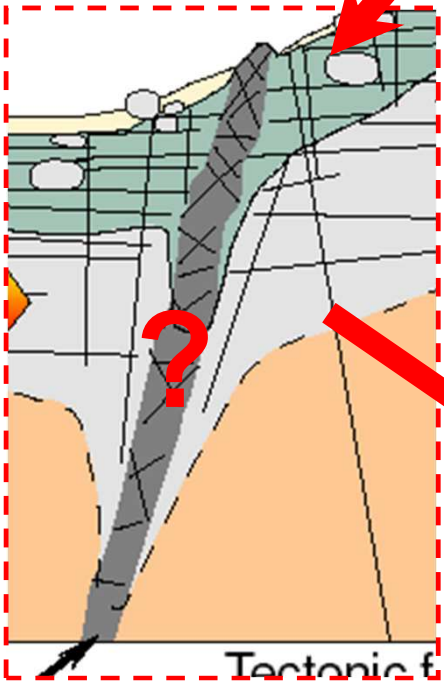


Géosciences pour une Terre durable  
**brgm**

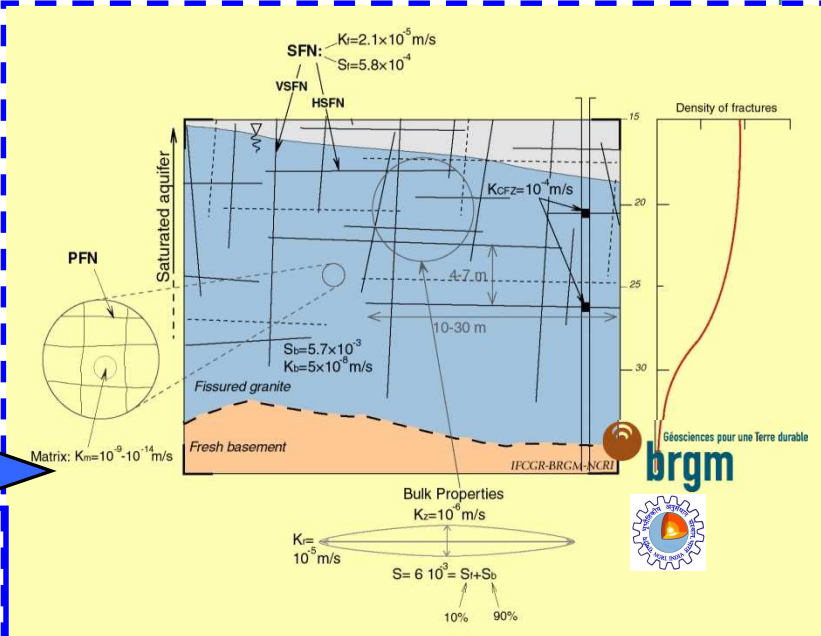


**Propriétés hydrodynamiques ?**

**Propriétés hydrodynamiques De l'horizon fissuré**



**Objectif:**  
**Compléter le modèle conceptuel des aquifères au niveau de discontinuités (filons, failles, dykes, etc.)**



**Modèle conceptuel de l'horizon fissuré (basé sur slug, débit-métrie, pompages d'essai) Maréchal et al. 2004 (WRR); Dewandel et al., 2006 (JoH); Guihéneuf et al., 2014 (JoH)...**

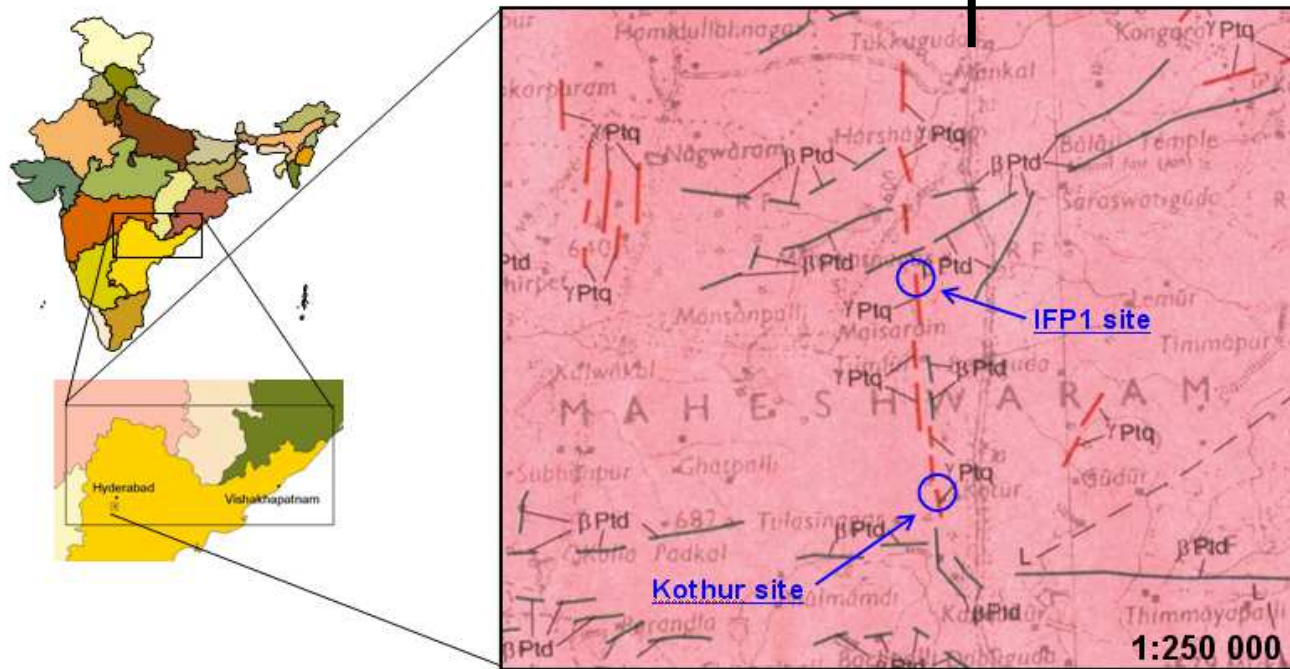
**Contrôlé par la densité des fissures, double porosité, anisotropie horizontale, etc.**



# Etude détaillée sur deux sites implantés sur un filon de quartz large de 20 à 40 m

Dewandel, B. et al., 2011. *J. of Hydrol.* -> hydrogéologie  
 Chandra, Dewandel et al., *J of Appl. Geoph.*-> géophysique

Hyderabad : 40 km

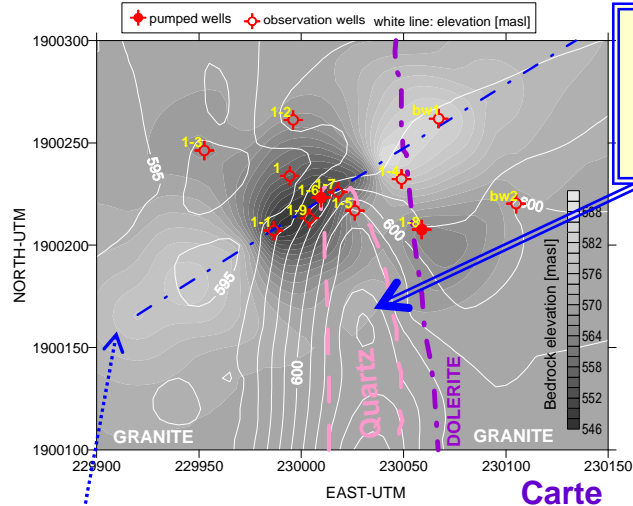


sciences pour une Terre durable



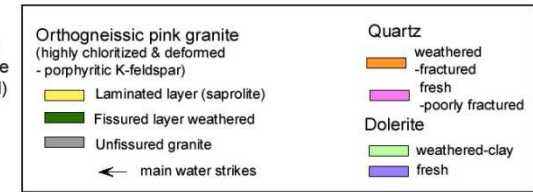
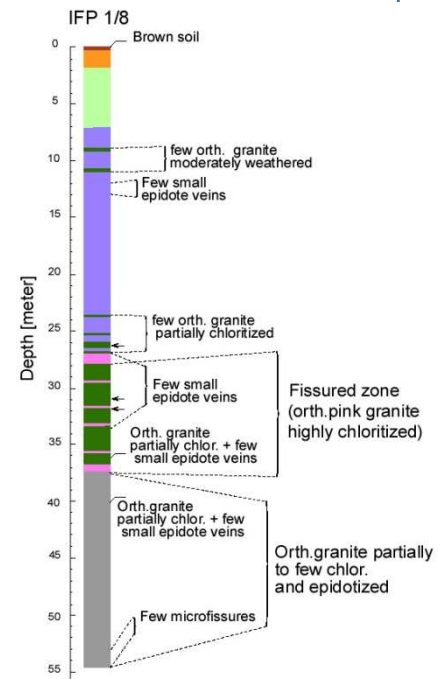
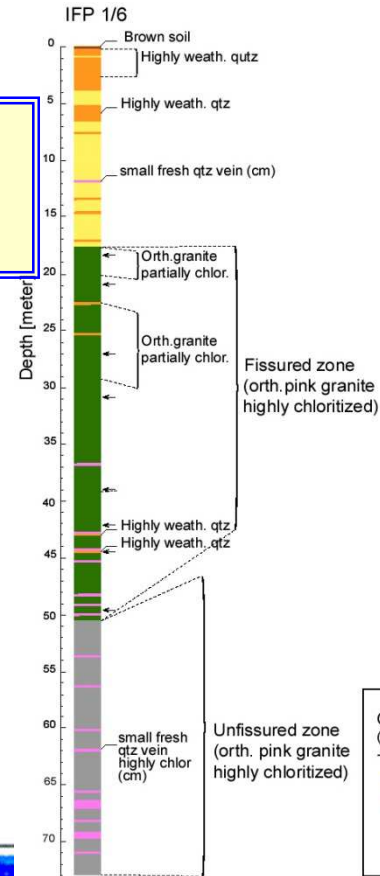
# Site IFP1: granite dans une zone de pincement du filon de quartz

## Site avec 12 forages

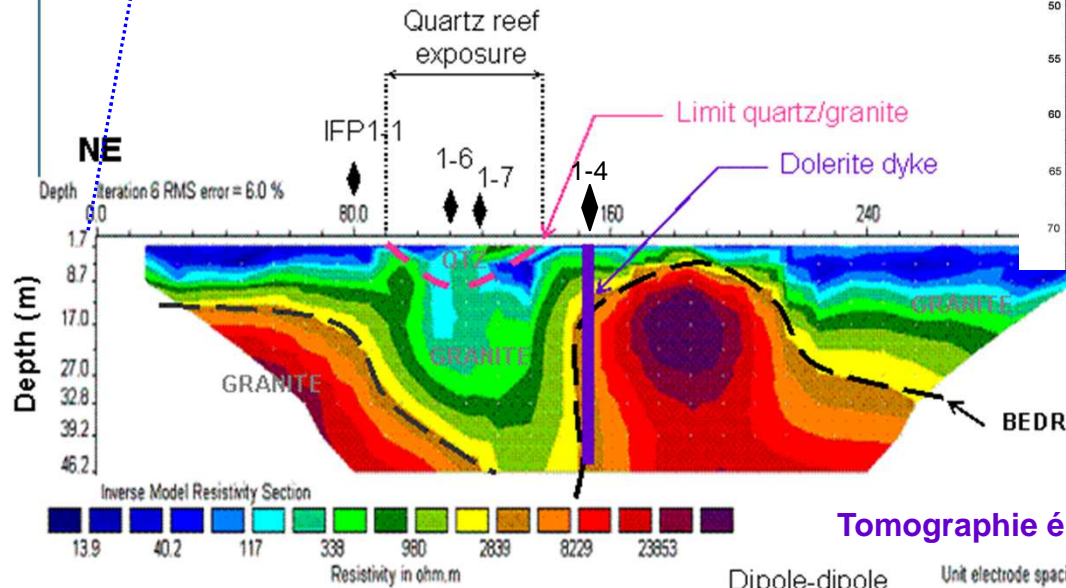


**Fractures du filon de quartz:**  
 - surtout N000 90  
 - aussi N100 90

Carte



## Logs géologiques détaillés



Tomographie électrique

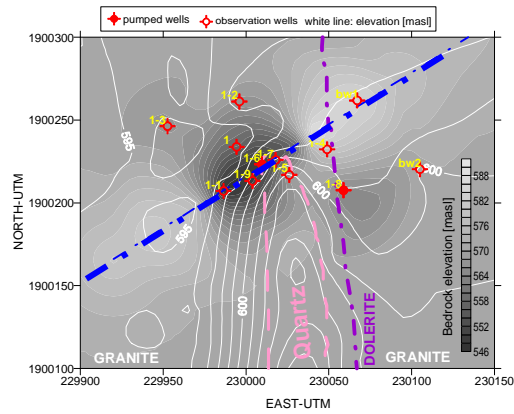
Dipole-dipole Unit electrode spacing 10.0 m.



Géosciences pour une Terre durable

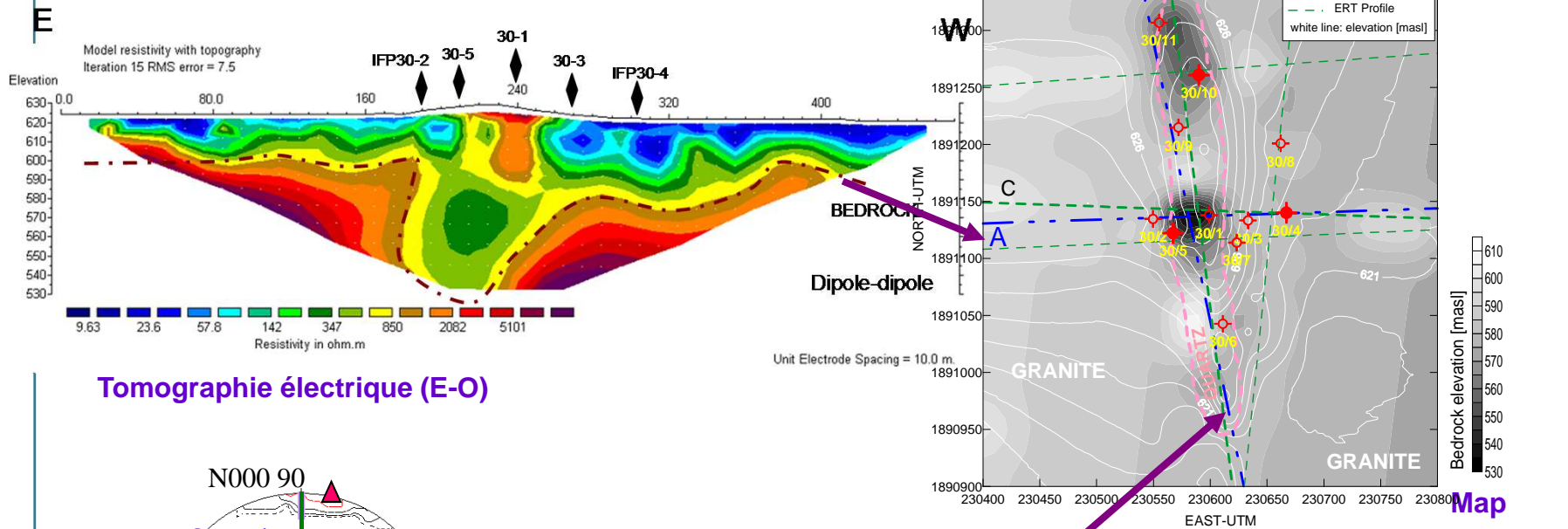
**brgm**

# Site IFP1 : modèle géologique (logs et tomographie électrique).

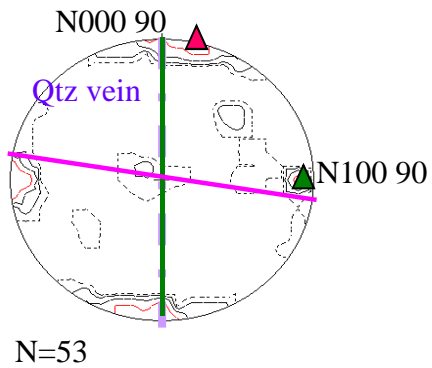


# Site de Kothur: zone de pincement et milieu du filon

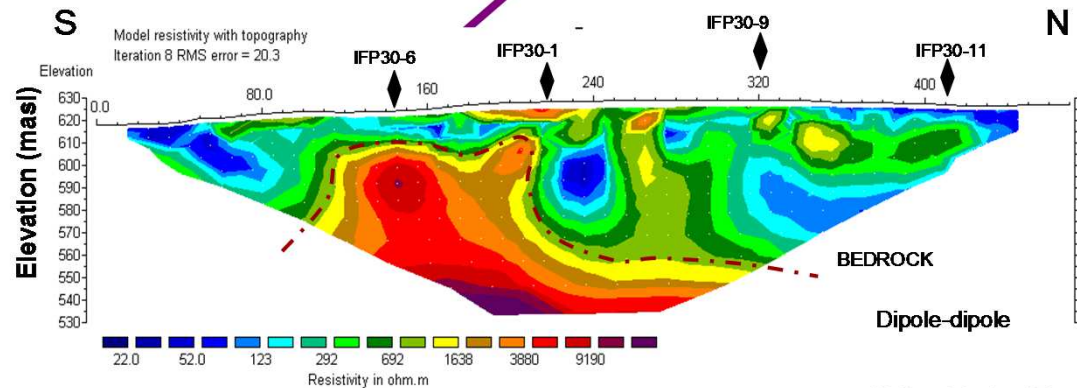
Site avec 11 forages (5 quartz; 6 granite)



Tomographie électrique (E-O)



**Fractures du filon de quartz:  
-surtout N005 90 et aussi N100 90**

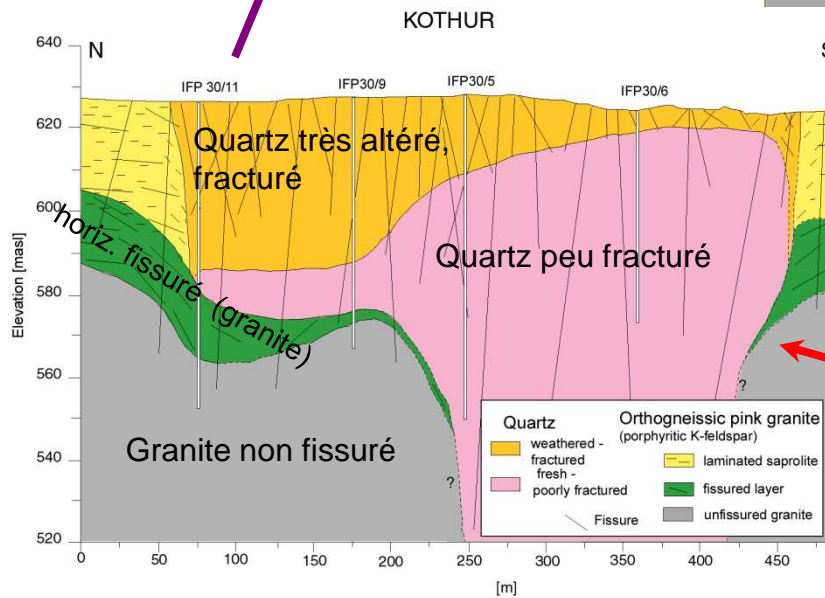
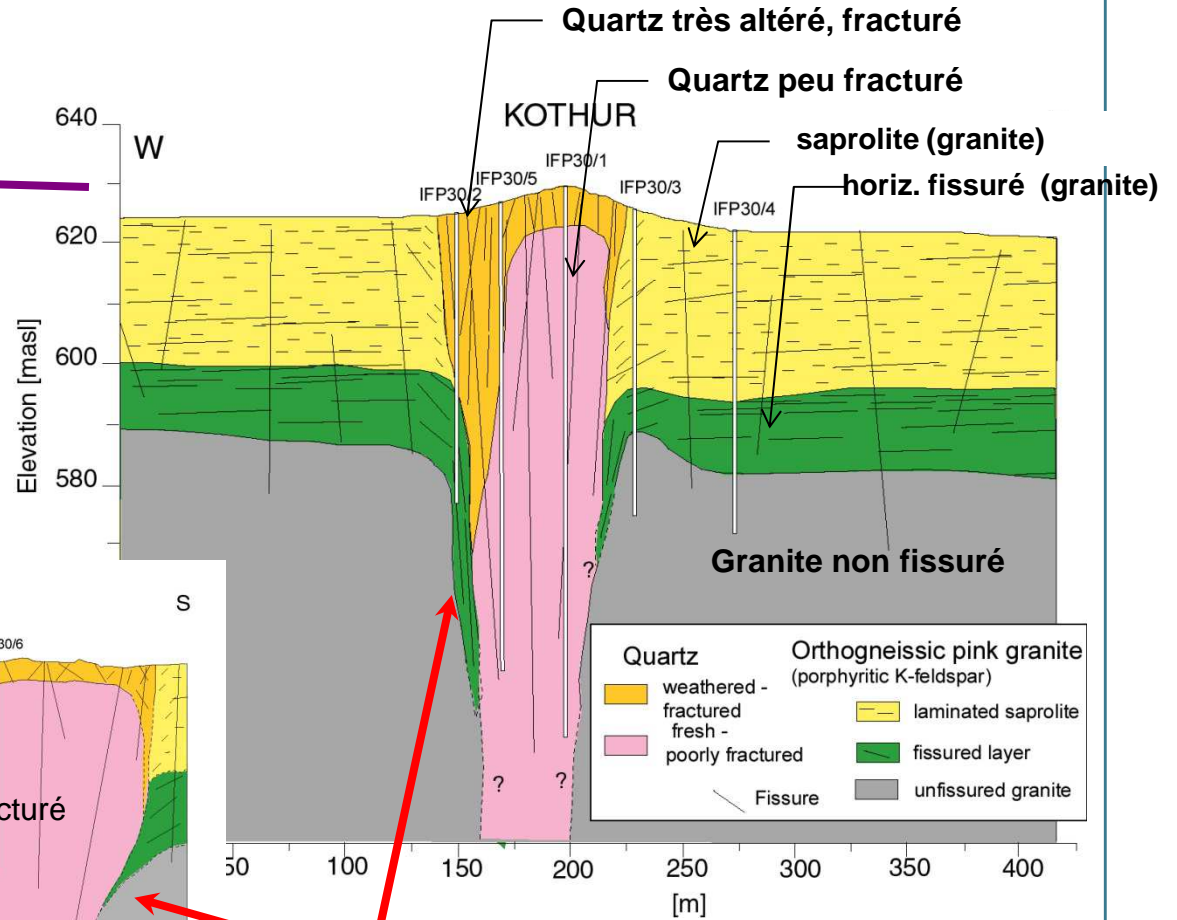
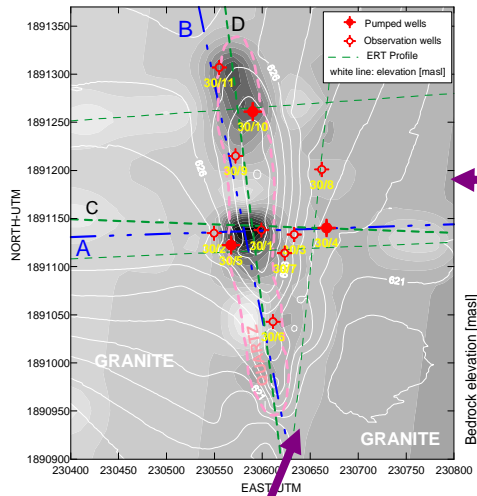


Tomographie électrique (N-S)





# Site de Kothur : modèle géologique (logs et tomographie électrique).



**Même constat: verticalisation de l'horizon fissuré, parallèle à l'intrusif**

# Structure géologique

## Dans le granite à proximité du filon de quartz:

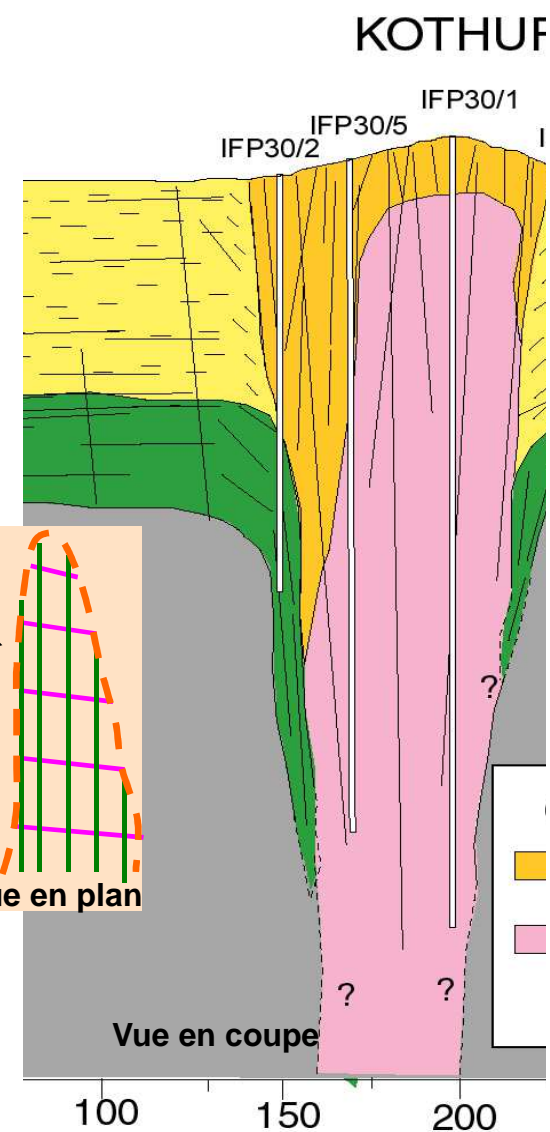
- > Approfondissement du profil d'altération (jusqu'à 100 m),
- > Augmentation de l'épaisseur de saprolite d'un facteur 1.5 à 3, et de 3 à 5 pour l'horizon fissuré (moyenne),
- > Structure du profil d'altération: toujours caractérisée par deux horizons subparallèles, mais subparallèles à la discontinuité et non à la paléo-surface contemporaine de l'altération comme dans le modèle classique,
- ⇒ le structure du profil en forme de 'U'.

## Dans le filon de quartz:

- > Essentiellement des fractures sub-verticales, subparallèles et sub-orthogonales au filon,
- > Partie sommitale très fracturée et très altérée,
- > Baisse rapide de la densité de fracture en profondeur,
- > mais au contact du granite: filon très fracturé et très altéré.

## Pourquoi un profil plus développé?

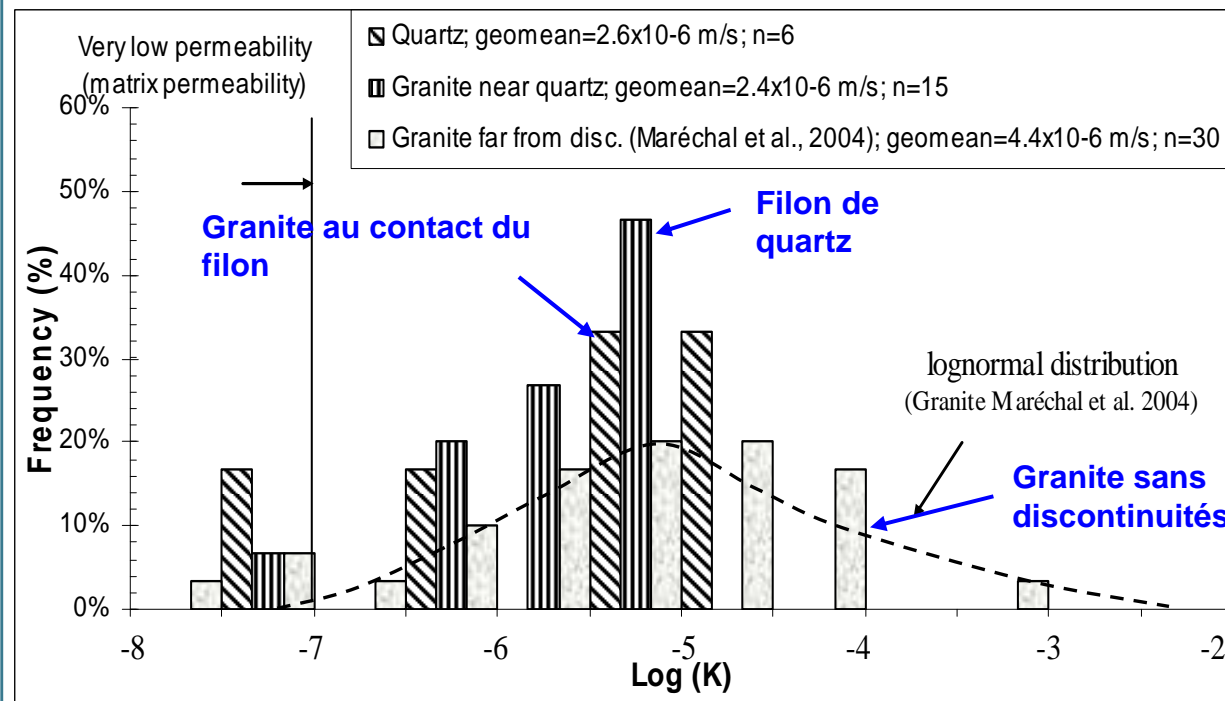
- > Les contraintes résultant de l'altération du granite encaissant induisent la fracturation du filon,
- > Cette fracturation induite permet une circulation d'eau en profondeur via le filon,
- > Cette circulation favorise un approfondissement local du profil d'altération dans le granite au contact avec le filon,
- > Et ainsi de suite...



# Quelles propriétés hydrogéologiques? Sont –elles différentes de celles du granite du profil d'altération classique?

21 slug tests et 5 essais par pompage en interférence ont été réalisés

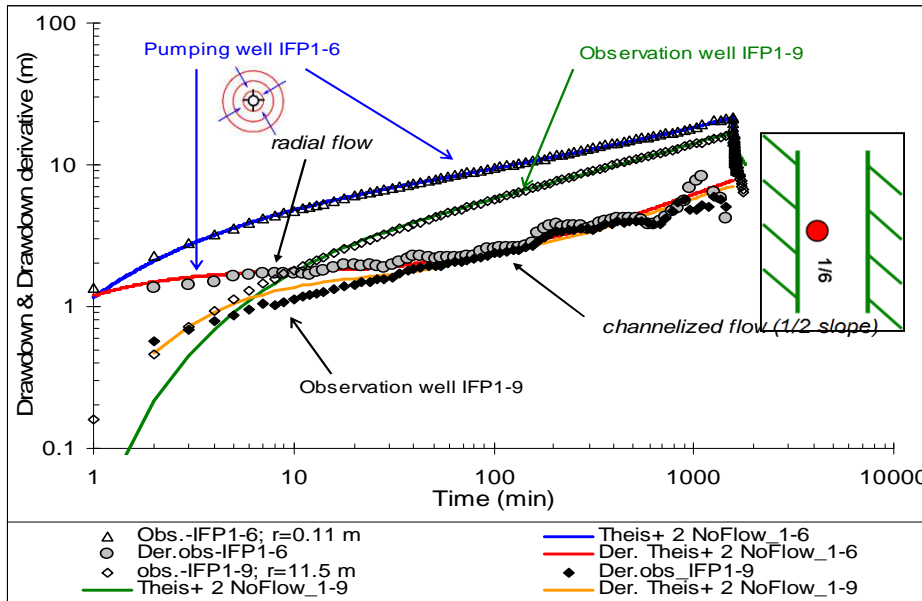
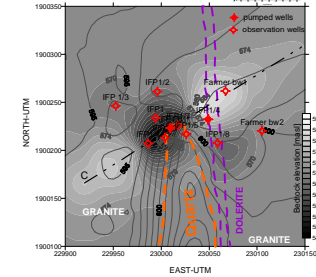
## Perméabilité (slug tests; petite échelle)



## Résultats:

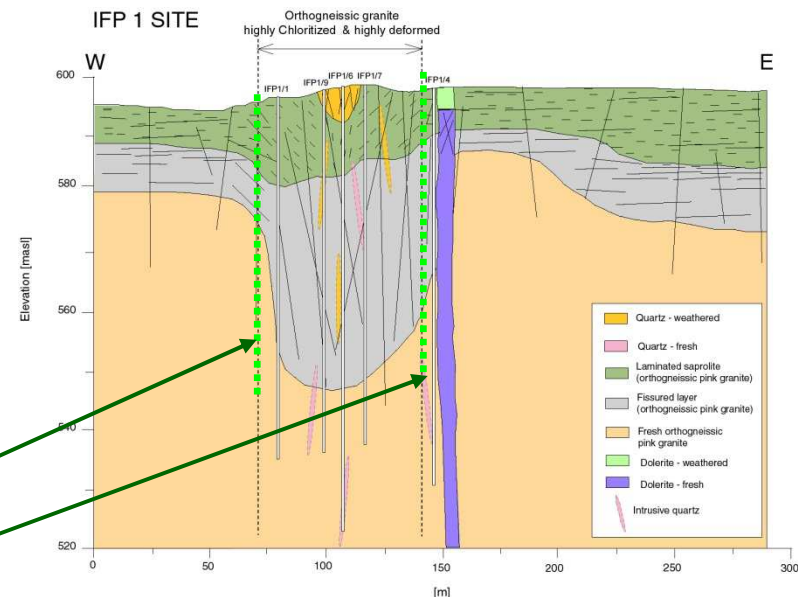
- **filon de quartz & granite près du contact : distribution similaire de la perméabilité,**
- **mais dans le filon forte variation: plus perméable sur les bords (plus altéré et fracturé) qu'en son cœur (moins fracturé)**

# Essais par pompage site IFP1, forage IFP1-6 -1.5 jours de pompage – utilisation de diagnostics avant modélisation (Bourdet et al., 1983)

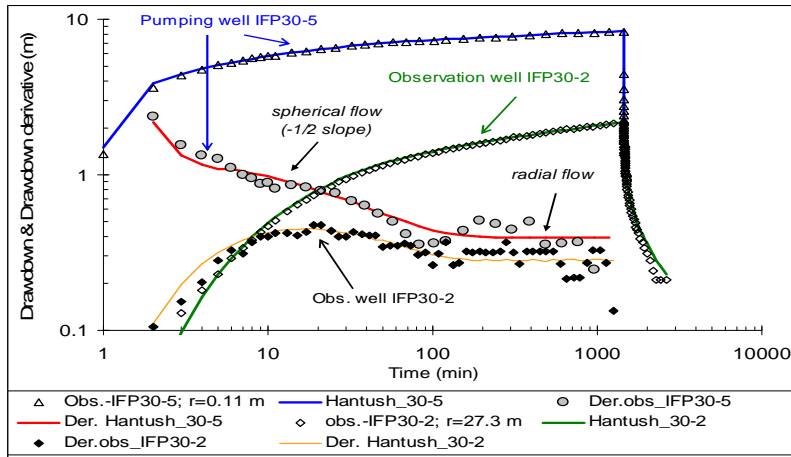


**Evidence d'un flux  
chenalisé contrôlé par la  
forme en 'U' du profil  
d'altération**

Well ID		r (m)	s-max*	K (m/s)	S (-)	NO flow Limit_1	NO flow Limit_2
						dist. (m)	dist. (m)
IFP1-6	pump. well	0.11	21.48	3.2E-06	-	18 **	42**
IFP1	obs.well	18.6	20.28	4.0E-06	7.0E-05	31 (10)***	138 (41)***
IFP1-1	obs.well	28.2	11.87	6.0E-06	4.2E-04	35	47
IFP1-2	obs.well	40.4	9.28	5.4E-06	1.6E-04	-	42
IFP1-5	obs.well	17.7	12.69	3.3E-06	1.1E-03	-	16 -
IFP1-7	obs.well	8.7	14.05	3.0E-06	2.6E-03	-	13
IFP1-9	obs.well	11.5	16.44	3.3E-06	8.3E-04	-	18
IFP1-3	obs.well	61.5	0.75	4.3E-06	9.9E-03	-	-
IFP1-4	obs.well	40.4	0.3	4.8E-05	2.6E-02	-	-
IFP1-8	obs.well	51.7	0.1	1.0E-04	6.3E-02	-	-
BW1	obs.well	69.3	NO reaction	-	-	-	-
BW2	obs.well	95.4	NO reaction	-	-	-	-
Average****				4.3E-06	7.8E-04	18.3	42.3

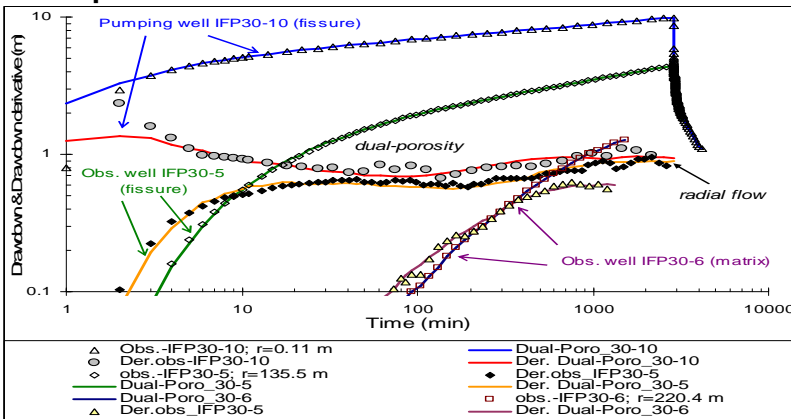


# Essais par pompage



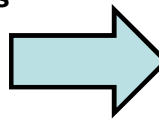
## Filon de quartz- fonctionnement captage partiel (Kothur; IPF30-5)

⇒ Identification de l'anisotropie verticale de perméabilité, de l'épaisseur transmissive



## Fonctionnement double porosité (Kothur; IPF30-10)

⇒ Identification des paramètres des fractures et des blocs du filon de quartz ( $K_f$ ,  $S_f$ ,  $K_{bloc}$ ,  $S_{bloc}$ )



**Table 3**  
Results of the interpretation of the pumping in IFP30-5 (Kothur site; quartz aquifer). Model: Hantush (partially penetrating well)

Well ID	r (m)	$s_{max}$ (m)	$K$ (m/s)	$S$ (-)	Anisotropy $K_v/K_h$ (-)	Aquifer thickness (m)	Screened thickness (m)***
IFP30-5 Pump. well	0.11	8.33	4.2E-06	-	3.1	110	35
IFP30-1 Obs.well	30.1	1.12	3.6E-06	1.4E-03	3.5	140	10
IFP30-2 Obs.well	27.3	2.13	2.6E-06	4.0E-04	2.0	130	40
IFP30-6 Obs.well	96.2	0.44	3.4E-06	1.8E-03	3.0	130	20
IFP30-7 Obs.well	52.5	0.45	2.9E-06	7.5E-03	10.0	110	50
IFP30-9 Obs.well	88.0	1.18	5.1E-06	4.5E-05	1.0	100	100
IFP30-10 Obs.well	135.5	1.06	5.5E-06	2.7E-05	1.0	100	100
IFP30-11 Obs.well	180.6	0.85	5.9E-06	3.5E-05	1.0	100	100
IFP30-3 Obs.well	62.5	No reaction	-	-	-	-	-
IFP30-4 Obs.well	103.0	No reaction	-	-	-	-	-
IFP30-8 Obs.well	118.0	No reaction	-	-	-	-	-
		Average**	4.0E-06	3.2E-04	3.1	115.0	
		St.Dev (±)	1.2E-06	2.7E-03	3.0	16.0	

St.Dev.: stand.  
\* Drawdown  
\*\* K and S an  
\*\*\* Estimated

## Filon de quartz : fonctionnement captage partiel (Kothur; IPF30-5)

**Table 4**  
Results of the interpretation of the pumping in IFP30-10 (Kothur site; quartz aquifer). Model: dual-porosity.

Well	r (m)	$s_{max}$ (m)	$K_f$ (m/s)	$K_m$ (m/s)	$S_f$ (-)	$S_m$ (-)	$S_{tot}$ (-)
IFP30/10 Pump. well	0.11	9.9	6.3E-06	2.4E-09	-	-	-
IFP30/1 Obs.well	123.2	3.38	8.5E-06	4.5E-10	4.9E-05	6.1E-05	1.1E-04
IFP30/2 Obs.well	115.1	3.63	6.5E-06	1.9E-09	4.2E-05	1.8E-04	2.2E-04
IFP30/5 Obs.well	135.7	4.42	6.5E-06	6.0E-10	1.5E-05	4.9E-05	6.4E-05
IFP30/6 Obs.well	222.0	1.27	1.1E-05	1.5E-09	8.5E-05	1.3E-04	2.1E-04
IFP30/7 Obs.well	145.0	1.04	6.0E-06	8.0E-09	2.4E-04	2.2E-03	2.5E-03
IFP30/8 Obs.well	92.0	0.18	2.1E-06	2.6E-08	4.9E-03	6.1E-02	6.6E-02
IFP30/9 Obs.well	49.4	5.5	6.5E-06	1.4E-09	2.6E-05	1.2E-04	1.5E-04
IFP30/11 Obs.well	57.8	4.97	6.2E-06	5.5E-09	5.2E-05	1.9E-04	2.4E-04
IFP30/3 Obs.well	132.8	No reaction	-	-	-	-	-
IFP30/4 Obs.well	144.5	No reaction	-	-	-	-	-
		Geometric***	6.2E-06	2.4E-09	8.9E-05	3.5E-04	4.6E-04
		St.Dev. (±)	2.4E-06	8.2E-09	1.7E-03	2.1E-02	2.3E-02

\* Observation  
\*\* Drawdown  
\*\*\* Geometric

## Filon de quartz : fonctionnement double porosité (Kothur; IPF30-10)

**Table 5**  
Results of the interpretation of the pumping in IFP30-4 (Kothur site; granite aquifer). Model: dual-porosity.

Well	WTFM	r (m)	$s_{max}$ (m)	$K_f$ (m/s)	$K_m$ (m/s)	$S_f$ (-)	$S_m$ (-)	$S_{tot}$ (-)
IFP30/4 Pump. well		0.11	10.31	6.4E-06	4.0E-09	-	-	-
IFP30/3 Obs.well		40.6	1.08	6.5E-06	7.0E-09	9.5E-05	6.7E-03	6.8E-03
IFP30/8 Obs.well								7.8E-03
								7.2E-03
								7.2E-04

## Granite près du filon de quartz : fonctionnement double porosité (Kothur; IPF30-4)

**Table 6**  
Results of th

Well ID	r (m)	$s_{max}$	K (m/s)	S (-)	Dist. (m)	
					NO flow Limit_d1	NO flow Limit_d2
IPF1-6 Pump. well	0.11	21.48	5.1E-06	-	20**	46**
IPF1 Obs.well	18.6	20.28	4.0E-06	7.0E-05	31 (10)***	138 (41)***
IPF1-1 Obs.well	28.2	11.87	6.0E-06	4.2E-04	35	47
IPF1-2 Obs.well	40.4	9.28	5.4E-06	1.6E-04	-	42
IPF1-5 Obs.well	17.7	12.69	7.9E-06	1.7E-02	25	44
IPF1-7 Obs.well	8.7	14.05	3.3E-06	1.1E-03	16	-
IPF1-9 Obs.well	11.5	16.44	3.0E-06	2.6E-03	13	42
IPF1-3 Obs.well	61.5	0.75	3.3E-06	8.3E-04	18	43
IPF1-4 Obs.well	40.4	0.3	4.8E-05	2.6E-02	-	-
IPF1-8 Obs.well	51.7	0.1	1.0E-04	6.3E-02	-	-
BW1 Obs.well	69.3	No reaction	-	-	-	-
BW2 Obs.well	95.4	No reaction	-	-	-	-
		Average***	4.5E-06	7.8E-04	19.5	44.3
		St.Dev. (±)	1.7E-06	6.0E-03	8.8	2.1

## Granite dans la zone de pincement du filon de quartz : fonctionnement aquifère compartimenté (IPF1-6)

Importante valorisation des données des pompages pour estimer les propriétés hydrodynamiques du filon de quartz et du granite proche

# CONCLUSION

## Granite loin du filon de quartz:

- Aquifère double porosité
  - Faible anisotropie X-Y (1)
  - Anisotropie verticale (X-Z):  $K_h/K_z=10$
- Maréchal et al., 2004; Dewandel et al., 2006...*

$K: 4 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ;  $S: 0.2 - 8 \times 10^{-3}$ ;  $K_{\text{blocs}}: 10^{-8} \text{ m/s}$

## Filon de quartz:

- Aquifère double porosité
- Anisotropie X-Y : 3 à cause des fractures verticales
- Anisotropie verticale (X-Z):  $K_h/K_z=3$
- Principales zones aquifères: bordures et zones de pincement

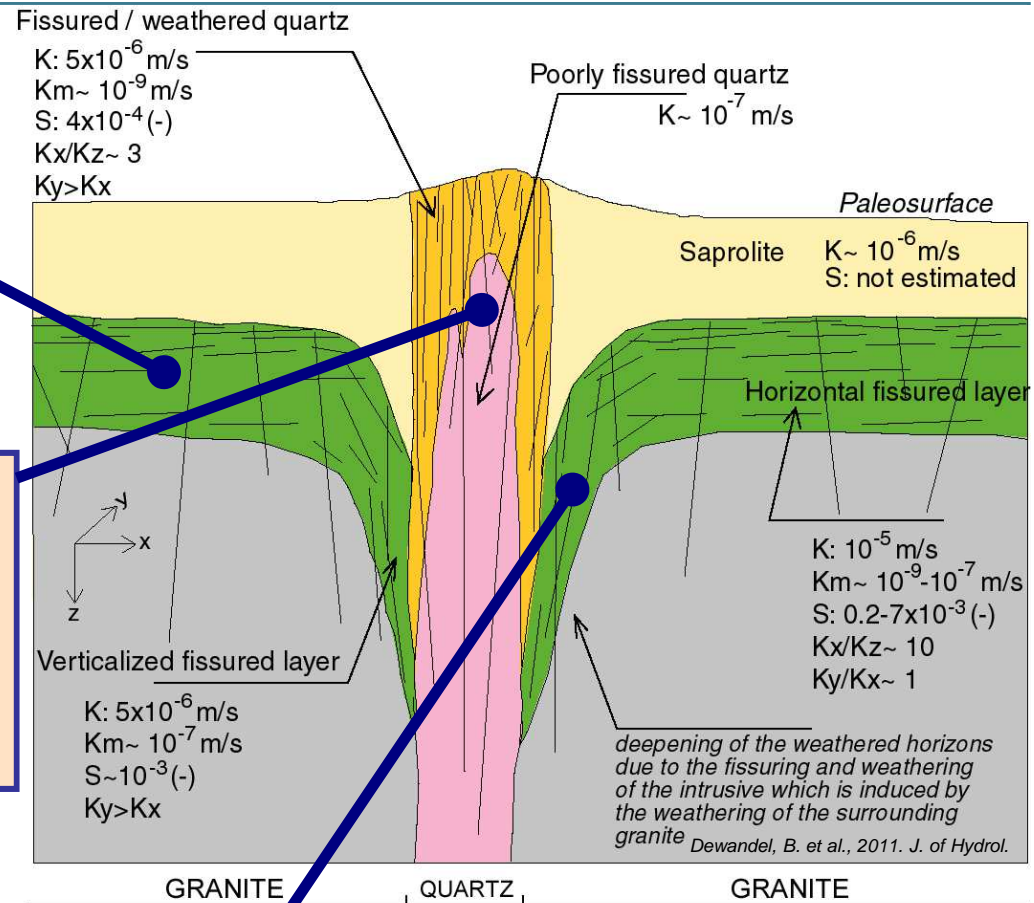
$K: 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ;  $S: 0.5 \times 10^{-3}$ ;  $K_{\text{blocs}}: 10^{-9} \text{ m/s}$

## Granite au contact:

- Horizon fissuré verticalisé:
- Anisotropie X-Y : 2-3 à cause des fractures verticales,
- Flux contraint par la géométrie de l'aquifère (structure géologique),
- Possible fonctionnement double porosité

$K: 4 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ;  $S: 0.8 \times 10^{-3}$

**D'autres discontinuités: veines, failles, contacts géologique..., peuvent avoir une géométrie de l'aquifère et un comportement hydrodynamique similaires**



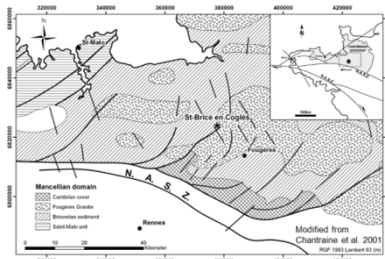
NOT TO SCALE  
 $K_y$ : parallel to the reef axis  
 $K_z$ : according to depth



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# Mais encore...



## Socle breton:

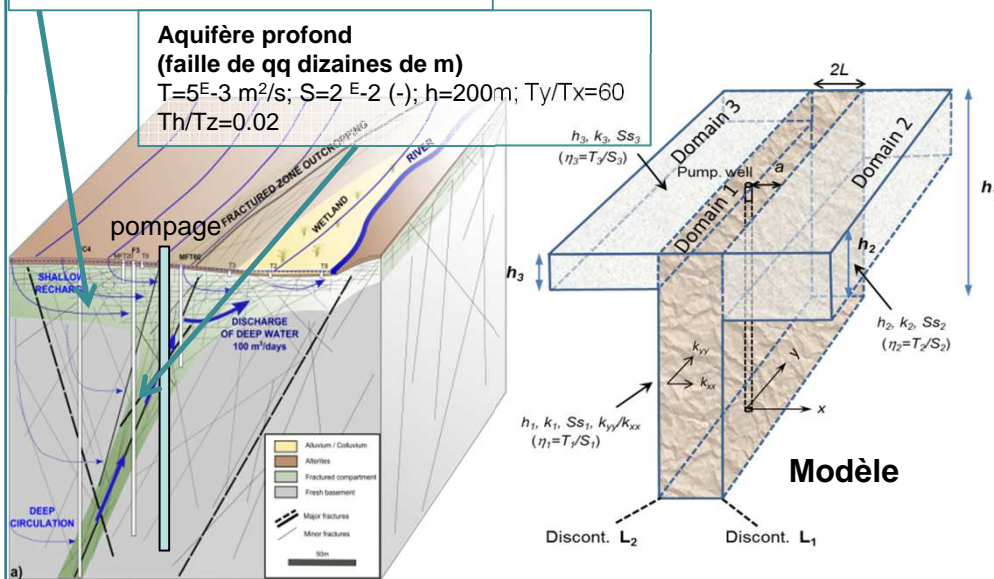
- ✓ géologie: cornéennes (schistes)
- ✓ altération supergène (saproлите: 10 m, horizon fissuré: 40–50-m)
- ✓ une fracture (faille) altérée en surface captée par le forage de 80 à 216 m drainant l'aquifère de surface

### Aquifère de surface (zone fissurée)

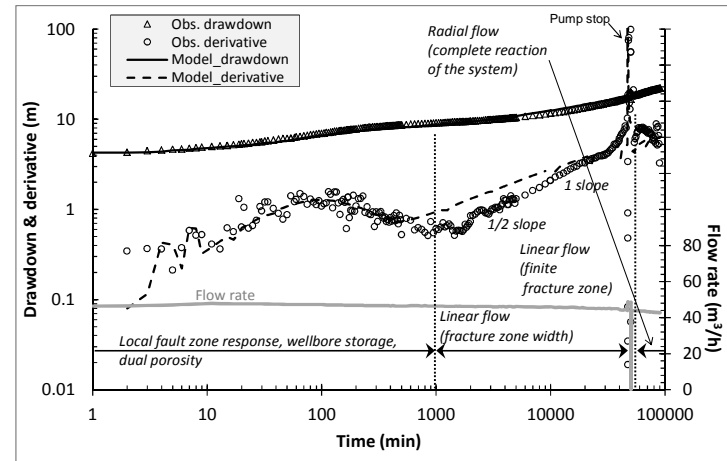
$T=2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $S=2 \times 10^{-5}$  (-);  $h=50 \text{ m}$

### Aquifère profond (faille de qq dizaines de m)

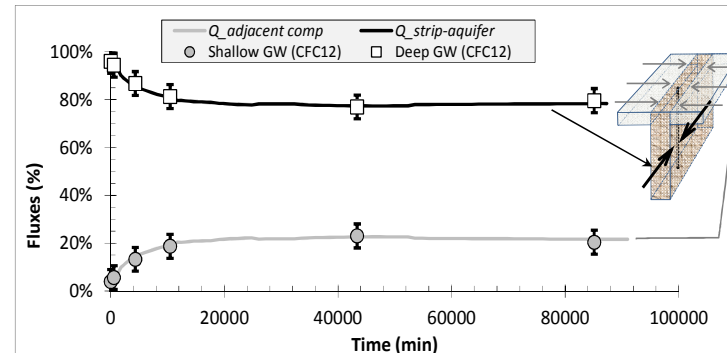
$T=5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $S=2 \times 10^{-2}$  (-);  $h=200 \text{ m}$ ;  $T_y/T_x=60$   
 $Th/Tz=0.02$



Modèle



Modélisation du rabattement ( $Q=45 \text{ m}^3/\text{h}$ ; essai de 65 j)



Modélisation des flux de la fracture et latéraux; comparaison à la datation

### Pour plus d'info sur ce site:

- Dewandel et al. 2014; J of Hydrol. -> solution analytique aquifère en « T »
- Roques et al. 2014a; J of Hydrol. -> fonctionnement hydrogéologique faille verticale
- Roques et al. 2014b; J of Hydrol. -> fonctionnement hydrogéochimique de la faille.
- ... ce colloque

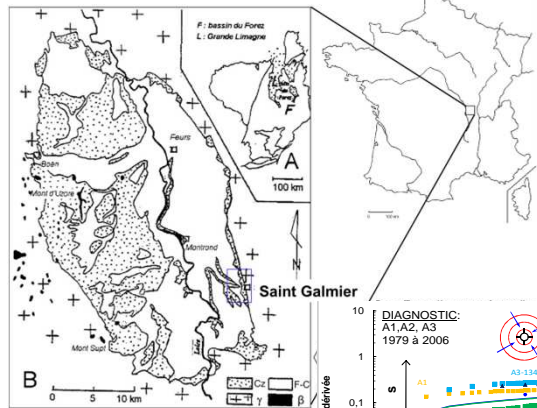
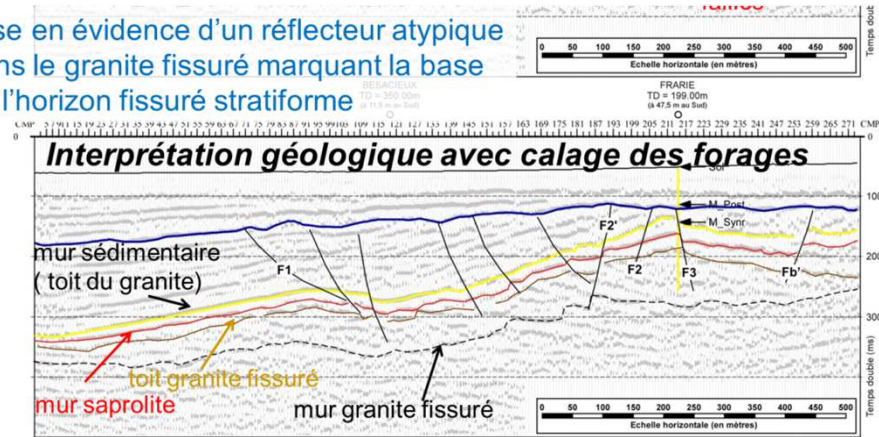
CASPAR : Caractérisation des Aquifères Semi-Profonds Armoricaains

# Mais aussi...

## Granite de Saint Galmier (Badoit)

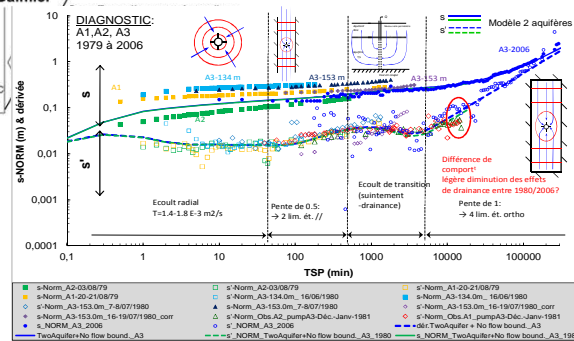
- ✓ altération supergène (saproлите : 5 à 20 m et horizon fissuré perméable : 100-125 m,
- ✓ profil sous couverture,
- ✓ graben de socle (granite) rempli de sédiments tertiaires argilo-sableux,
- ✓ secteur très faillé,
- ✓ eaux minérales carbo-gazeuses...

Mise en évidence d'un réflecteur atypique dans le granite fissuré marquant la base de l'horizon fissuré stratiforme



## Structure complexe de l'aquifère de socle :

- Réservoir très productif,  $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}!!$  = horizon fissuré probablement « dopé » localement par des fractures tectoniques
- Réservoir compartimenté : horizon fissuré limité par les failles altérées étanches et le contact sédimentaire/socle



Projet R&D Danone - BRGM



## Pour plus d'info :

Ce colloque - poster:  
 Aquifères de socle sous couverture sédimentaire : quelles sont les propriétés hydrodynamiques du profil d'altération ?  
 Exemple du granite de Saint Galmier (France)

Dewandel, Lachassagne, Bailly-Comte, Lanini, Ladouche, Maréchal, Couëffe, Barbet, Grataloup & Wyns





Merci

Filon de quartz Kothur – Inde