

***Deux études  
sur les relations  
entre les microstructures  
et le transport de fluides  
dans les roches***

**Christian DAVID**  
**Laboratoire Géosciences & Environnement Cergy**

# *Imagerie par rayons X d'expériences d'ascension capillaire*

**Beatriz MENENDEZ**

**GEC - UCP**



**Adeline PONS**

**Jérôme FORTIN**

**ENS Paris**



**Sergei STANCHITS**

**GFZ Potsdam**



**Jean-Marie MENGUS**

**IFP**



**Objectif : étudier les relations entre**

- \* *l'écoulement de fluide***
- \* *les microstructures***
- \* *l'endommagement mécanique***

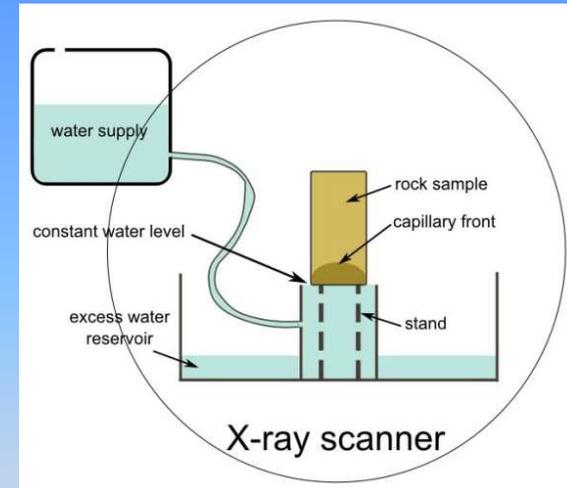
**dans des expériences en laboratoire  
sur des roches poreuses**

### **Outils**

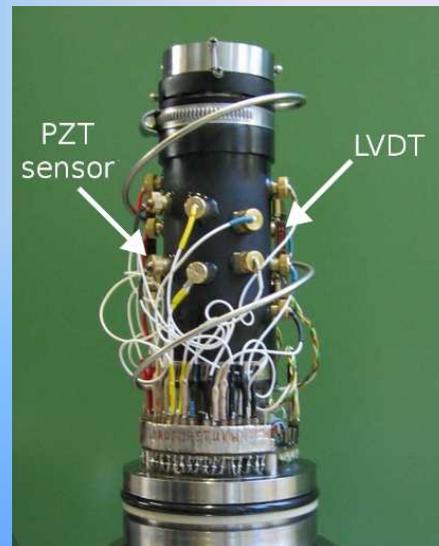
- \* *expériences d'ascension capillaire***
- \* *imagerie par scanner RX***
- \* *essais mécaniques avec émissions acoustiques***
- \* *traitement d'images***

## Trois étapes

**#1 : Imager la montée  
capillaire au scanner  
RX sur les  
échantillons intacts**



**#2 : déformation mécanique  
dans une presse triaxiale avec  
enregistrement des émissions  
acoustiques**

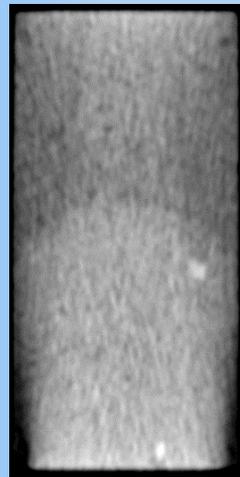


**#3 : retour au scanner  
pour imager la montée  
capillaire sur les  
échantillons déformés**

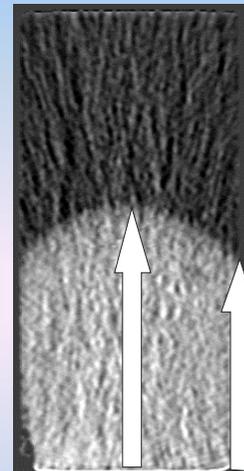


# METHODOLOGIE

Zone sèche  
Front capillaire  
Zone humide



**Image brute**



**Traitement d'image**

measured

height at center :  $H(t)$   
height at border :  $h(t)$

derived

velocity :

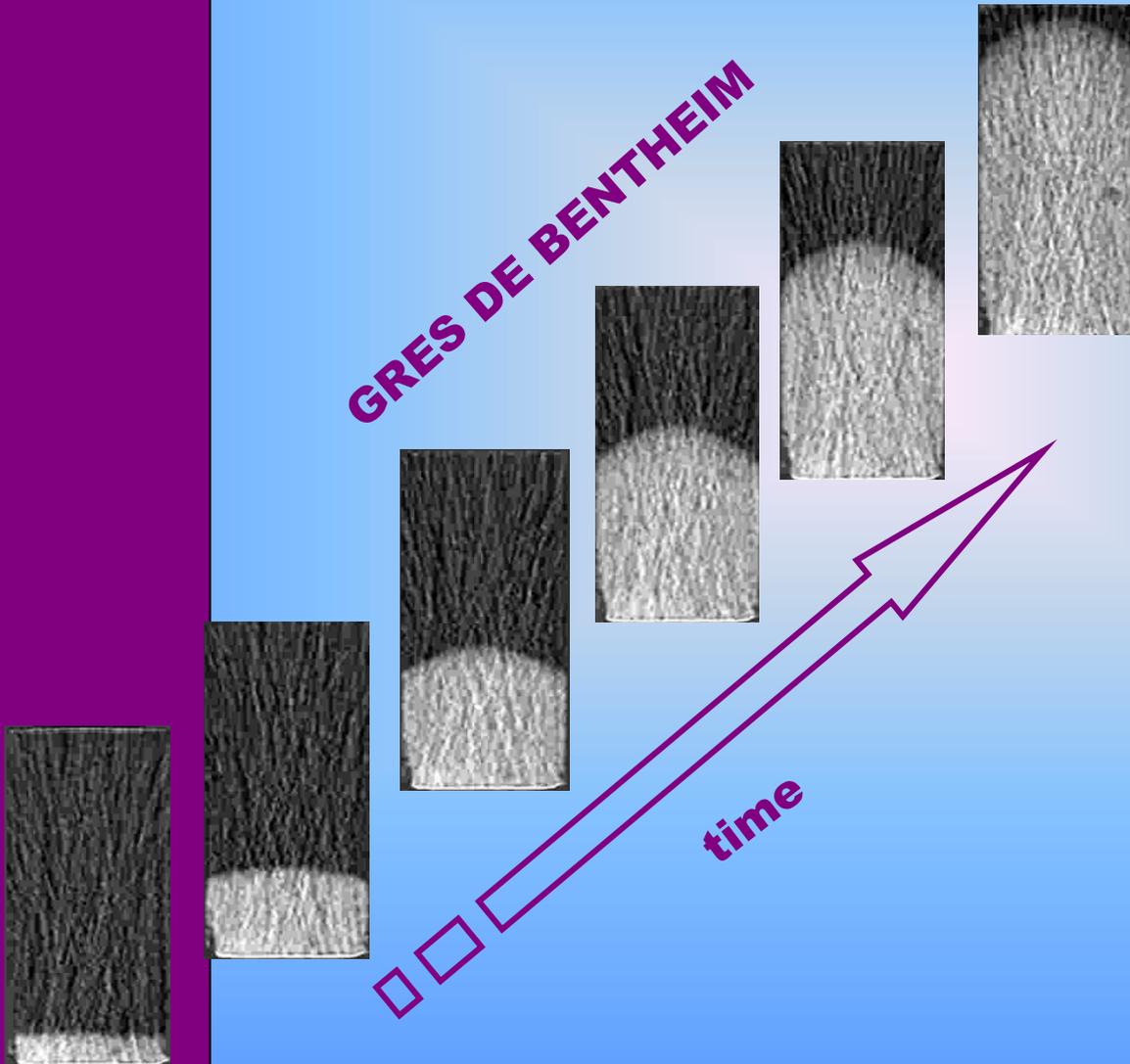
$$v(t) = \frac{dH(t)}{dt}$$

radius of curvature  
of capillary front :

$$\rho(t) = \frac{(H-h)^2 + R^2}{2(H-h)}$$

# EXEMPLE TYPIQUE

**GRES DE BENTHEIM**



## Conditions

échantillon :

L = 80 mm  
D = 40 mm

Nombre d'images :

~170 coupes axiales

pas temporel :

~2.5 secondes

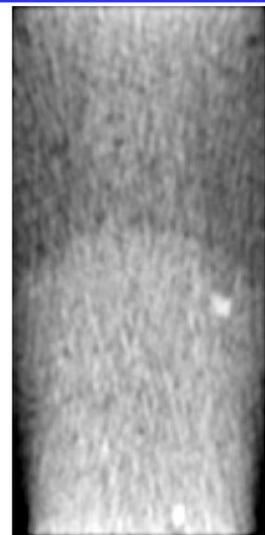
durée totale :

~ 10 minutes

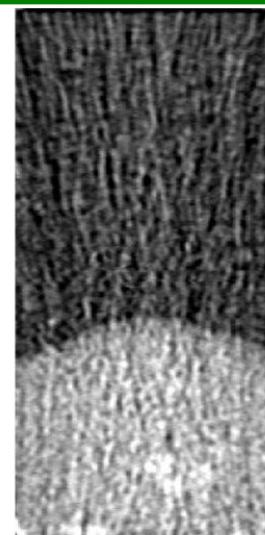
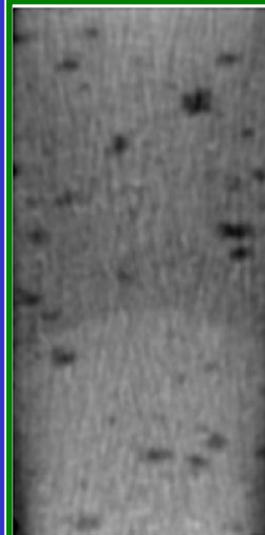
	LIMESTONES		SANDSTONES	
	<i>Majella</i>	<i>Saint-Maximin</i>	<i>Vosges</i>	<i>Bentheim</i>
porosity (%)	30	37	25	22
mean grain diameter (μm)	54	140	110	200
major composition*	CA(100%)	CA(61%) QZ(39%)	QZ(50%) FE(30%) CL-OX(20%)	QZ(95%) CL(5%)
peak diameter on Hg porosimetry spectrum (μm)	16.2	26.4	28.7	28.8
permeability (D)	0.145	0.97	0.165	1.1

\* QZ=quartz; FE=feldspar; CA=calcite; CL=clays; OX=oxydes

## SANDSTONES

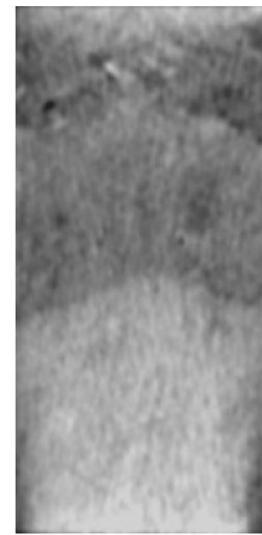


***Bentheim***

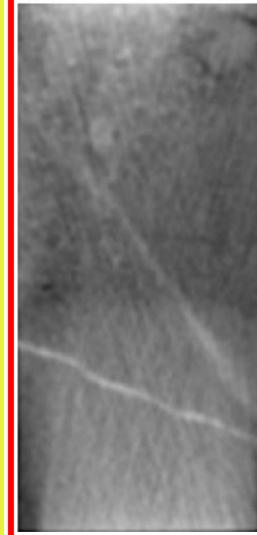


***Vosges --> processed***

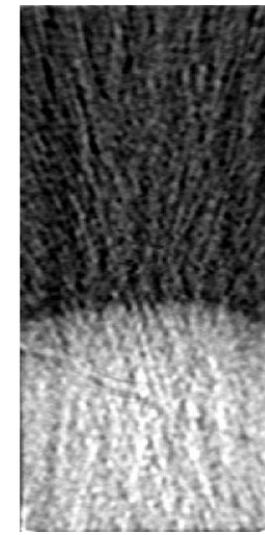
## LIMESTONES



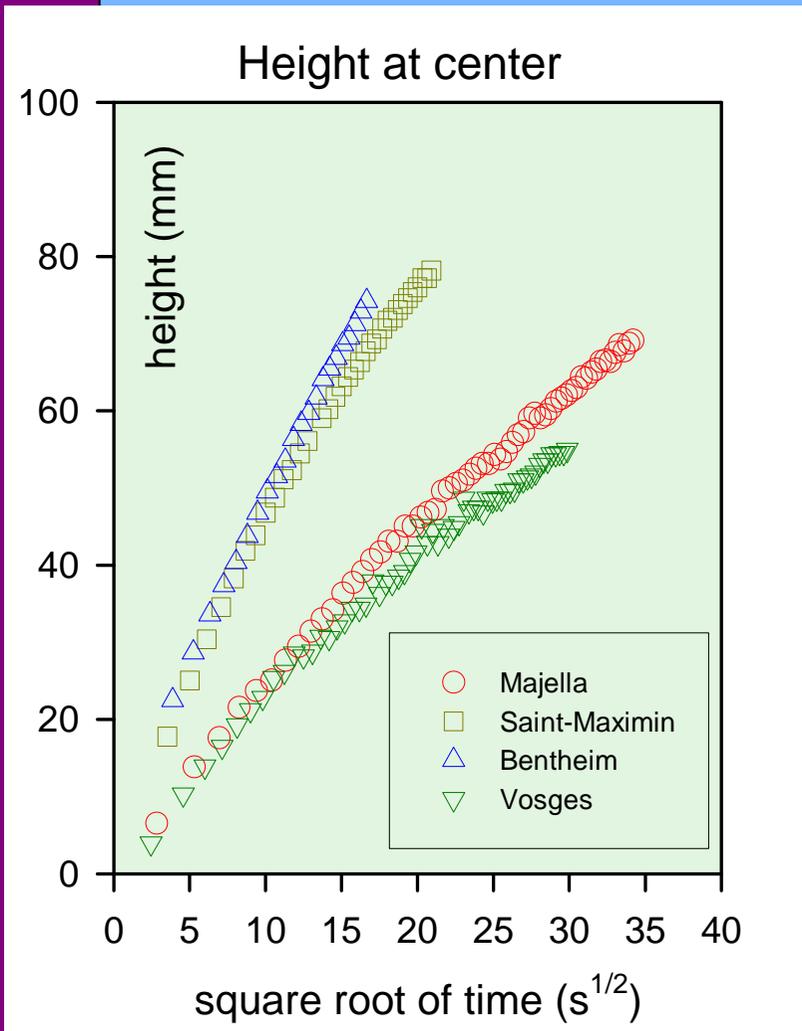
***Saint-Maximin***



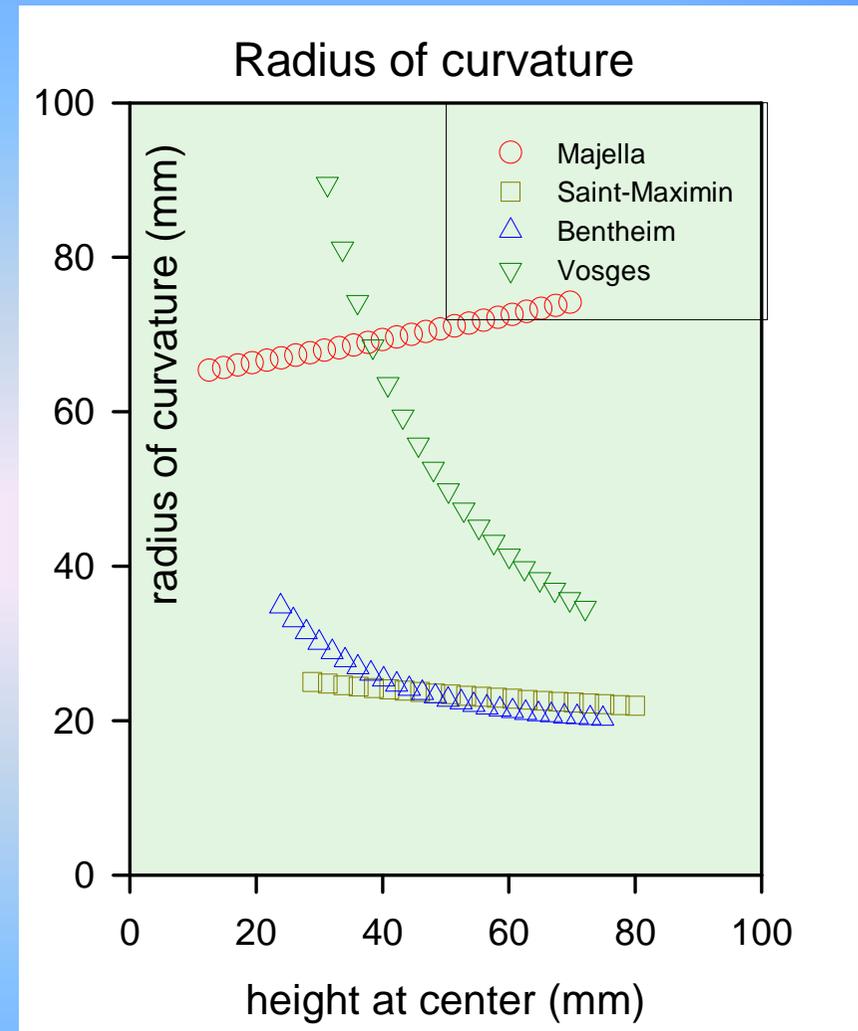
***Majella --> processed***



## Cinétique d'imbibition

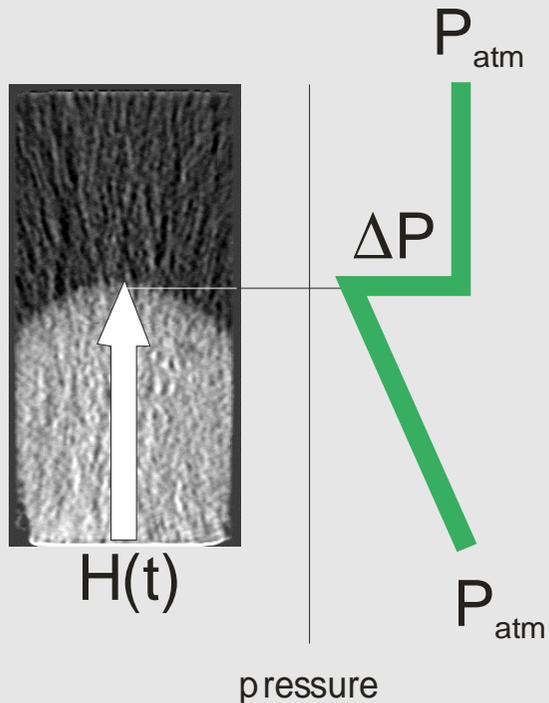


## Géométrie des fronts



mean slope :  $A = \frac{dH}{d(\sqrt{t})}$

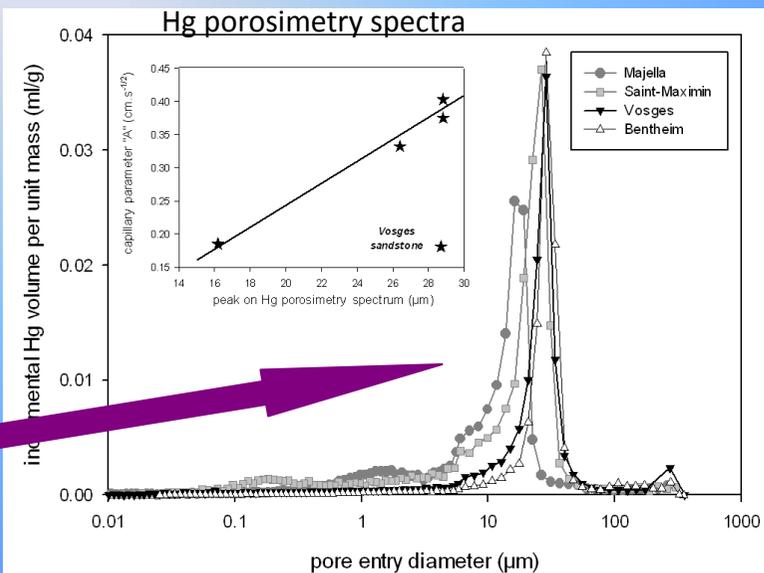
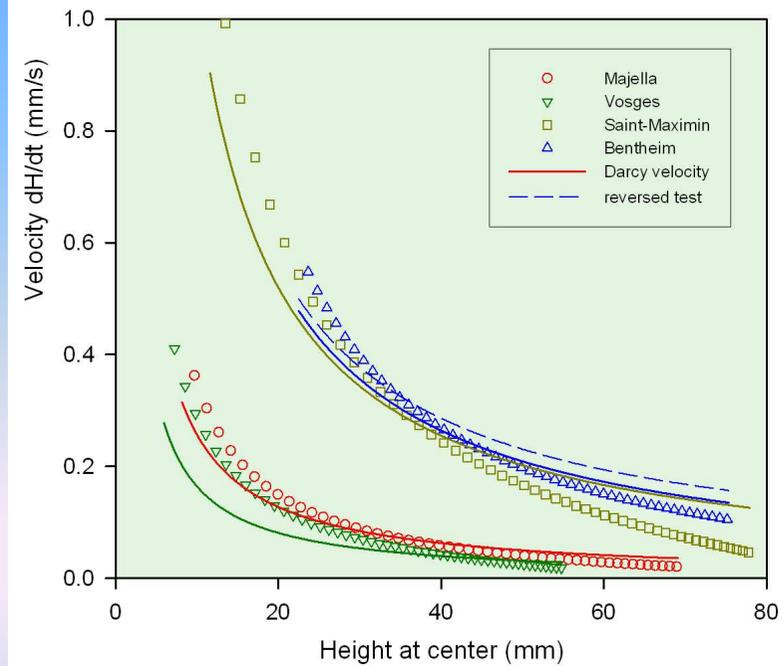
# Comparaison avec un modèle de tube capillaire



$$\vec{U} = -\frac{k}{\eta} \left( \nabla \vec{P} - \rho \vec{g} \right)$$

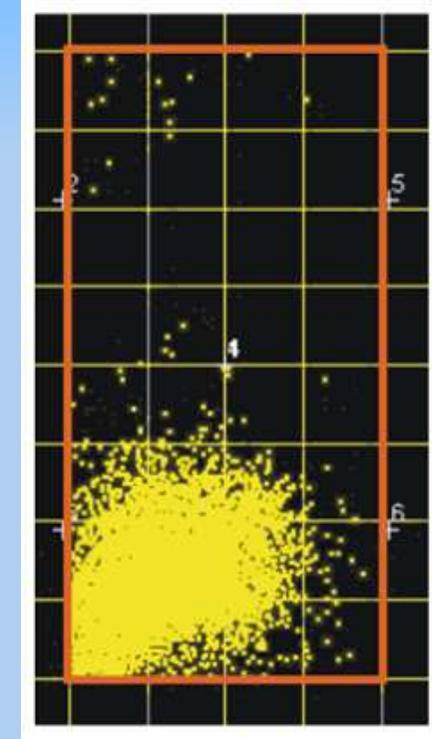
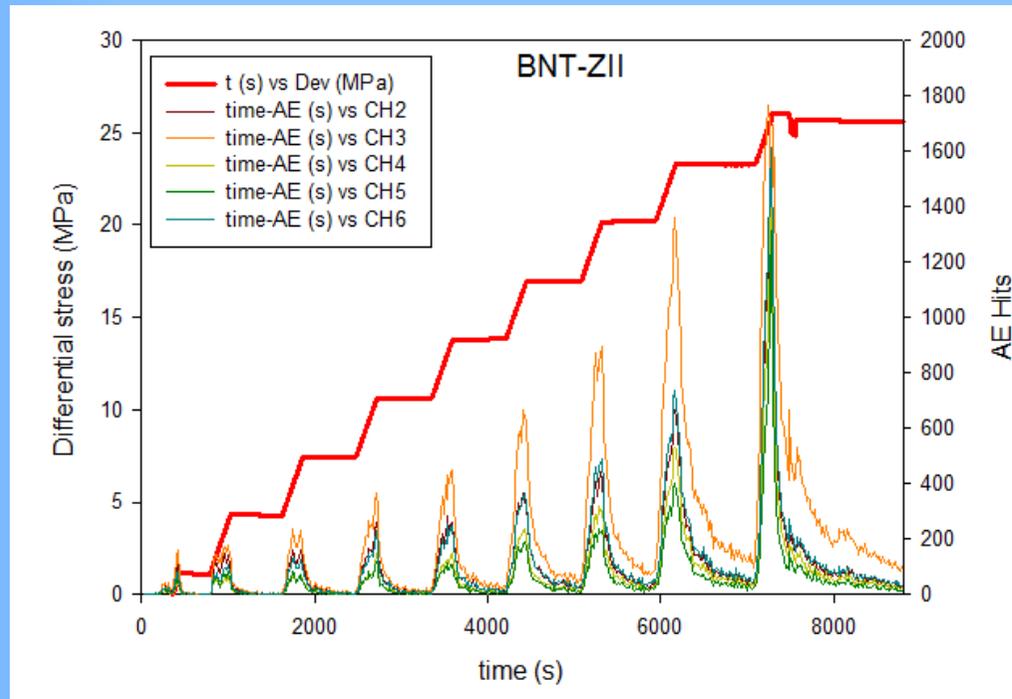
$$\left| \nabla \vec{P} \right| = \frac{\Delta P}{H(t)}$$

$$\Delta P = P_{cap} = \frac{2\gamma \cos \theta}{r}$$



# Effet de l'endommagement mécanique :

## 1) fracture dans le grès de Bentheim



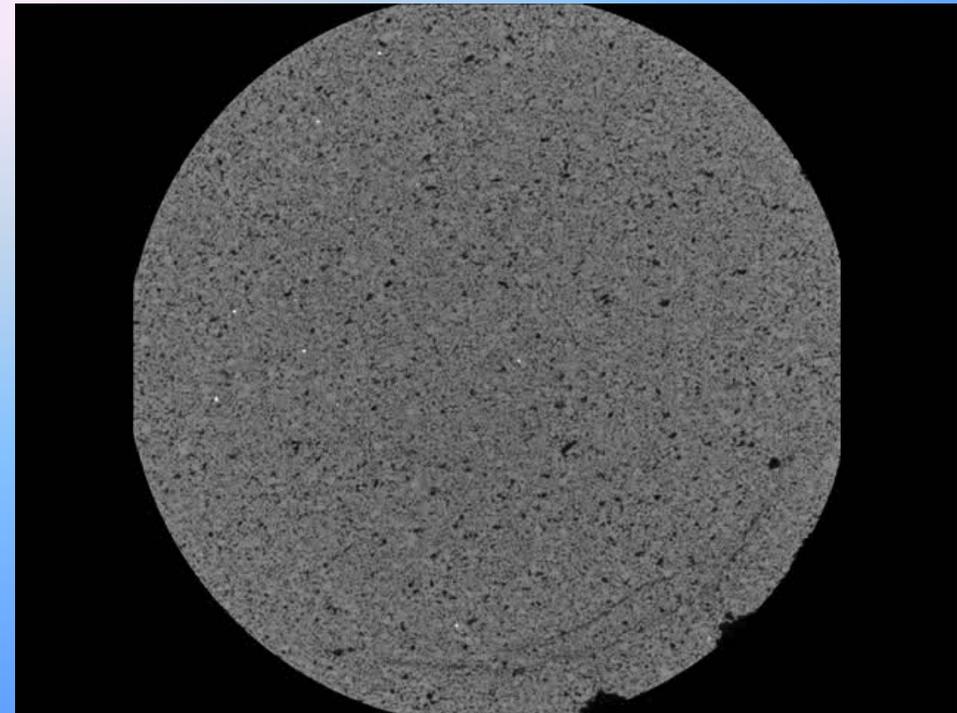
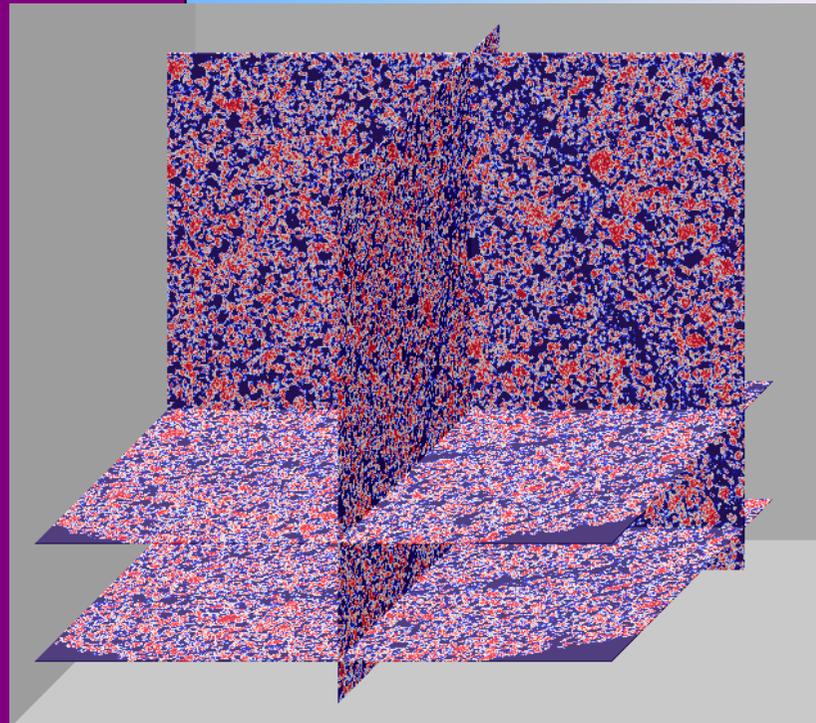
- fluage par paliers à contraintes croissantes
- comportement fragile (dilatance)
- fracture détectée par les émissions acoustiques

# Effet de l'endommagement mécanique



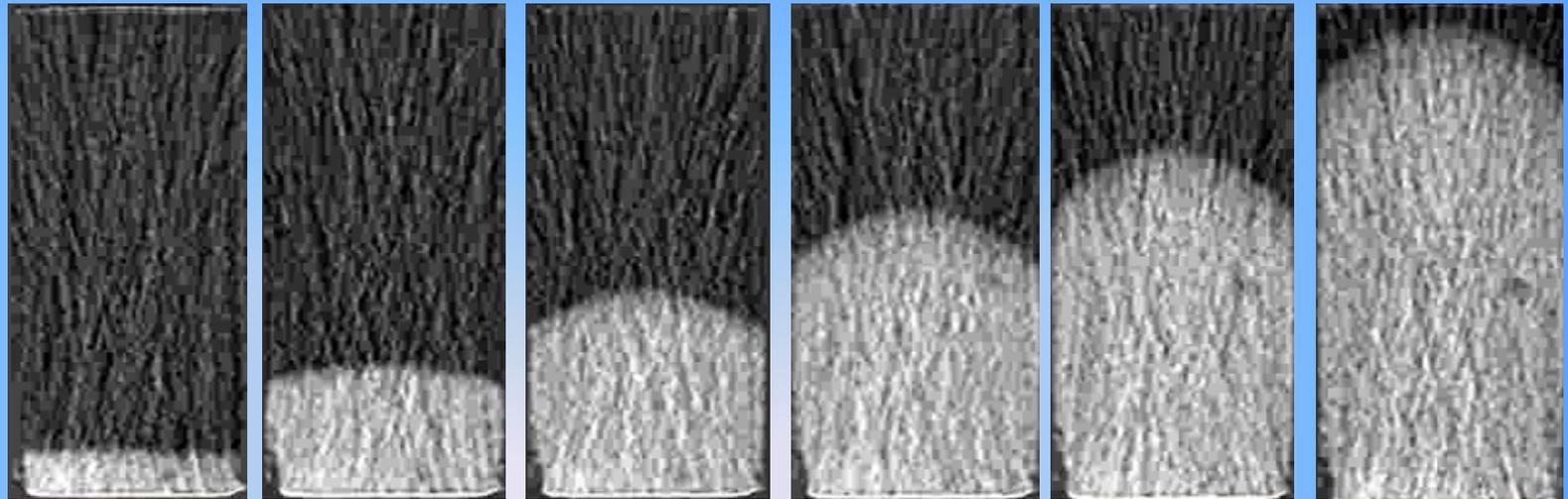
Carte de densité RX  
Scanner médical IFP

Microtomographie Nanotom - PHOENIX X-Ray (IFP)

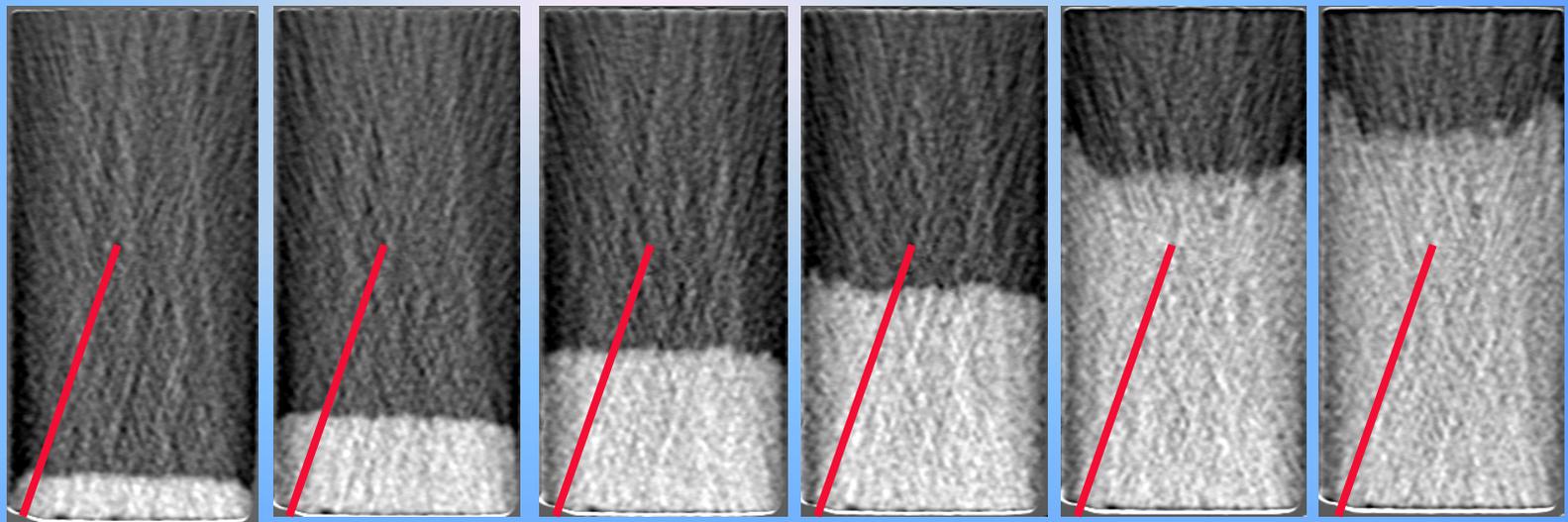


# Effet de la fracture sur l'imbibition

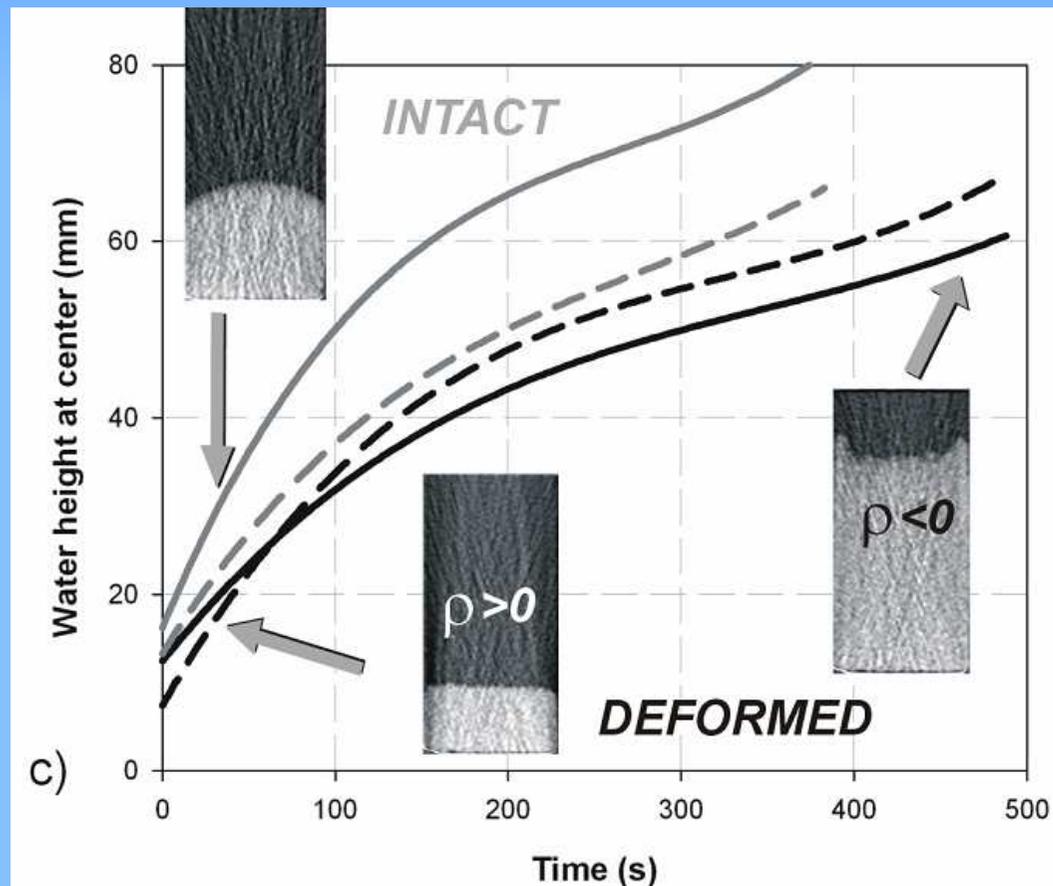
I  
N  
T  
A  
C  
T



D  
E  
F  
O  
R  
M  
E



## Effet de la fracture sur l'imbibition

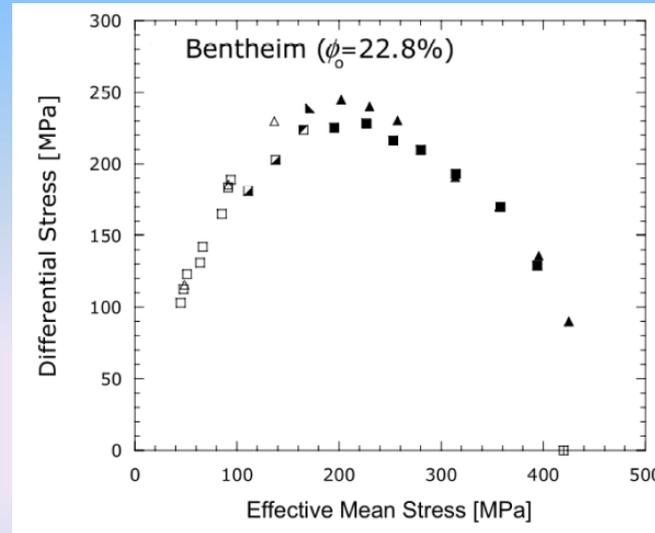


(David et al., GRL, 2008)

- **modification de la géométrie du front capillaire**
- **inversion du rayon de courbure**

# ENDOMMAGEMENT MECANIQUE :

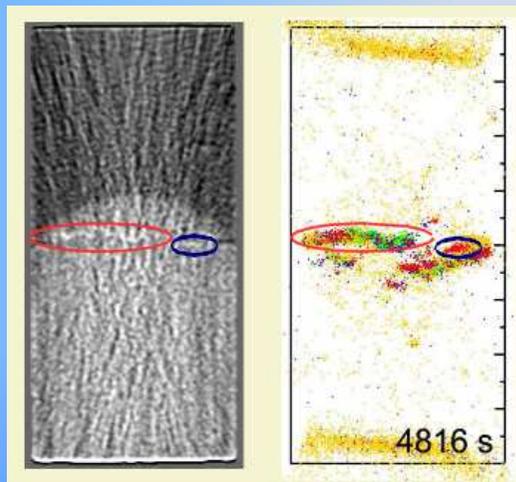
## bandes de compaction



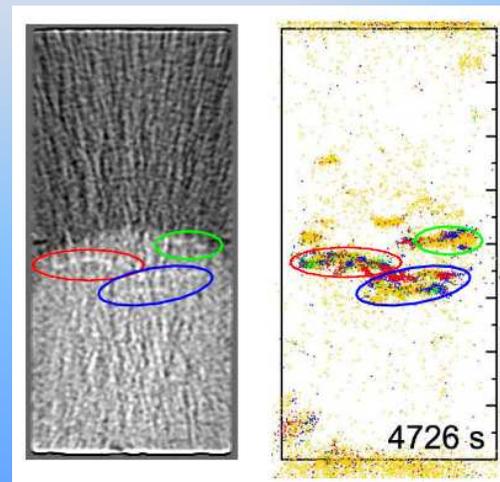
Essai triaxial

$P_c = 195$  MPa

$P_p = 10$  MPa



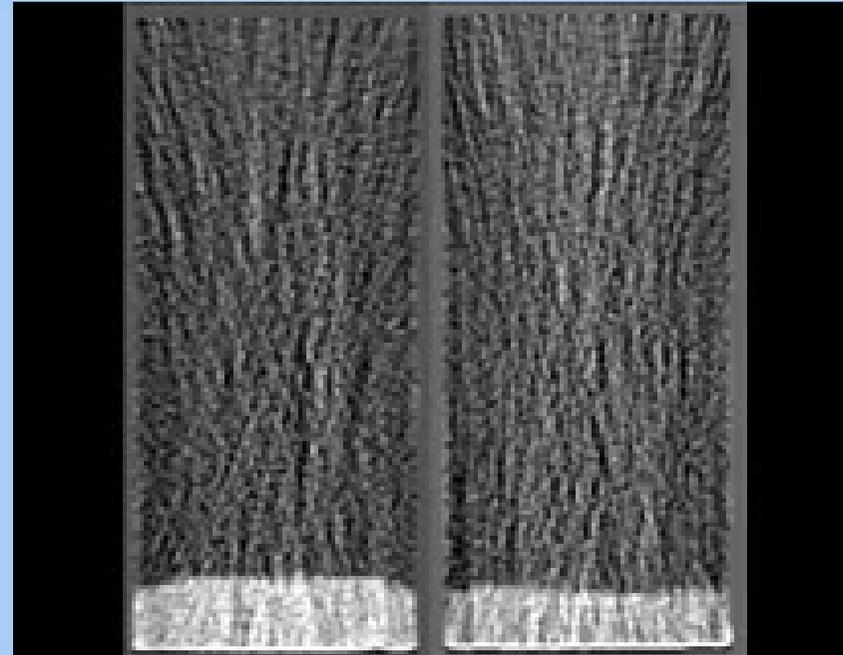
échantillon #1



échantillon #2

# ENDOMMAGEMENT MECANIQUE :

## bandes de compaction

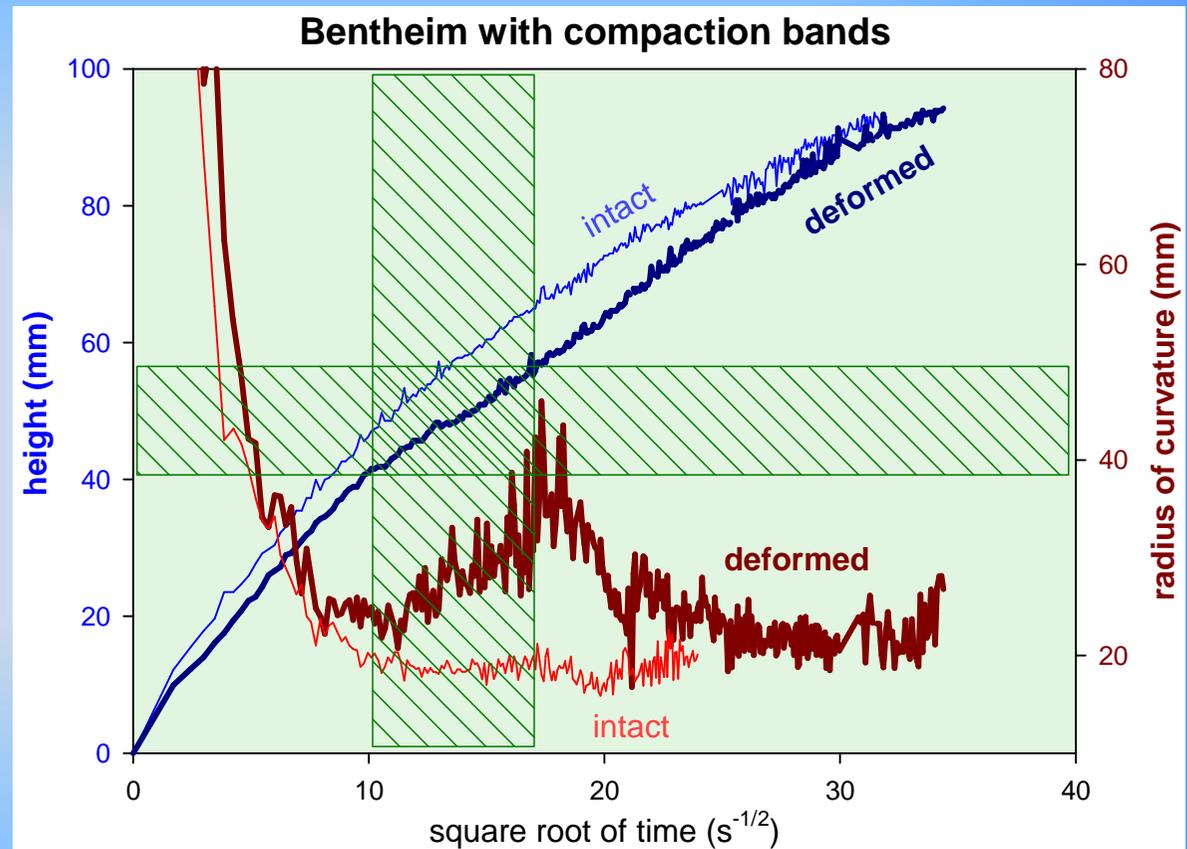
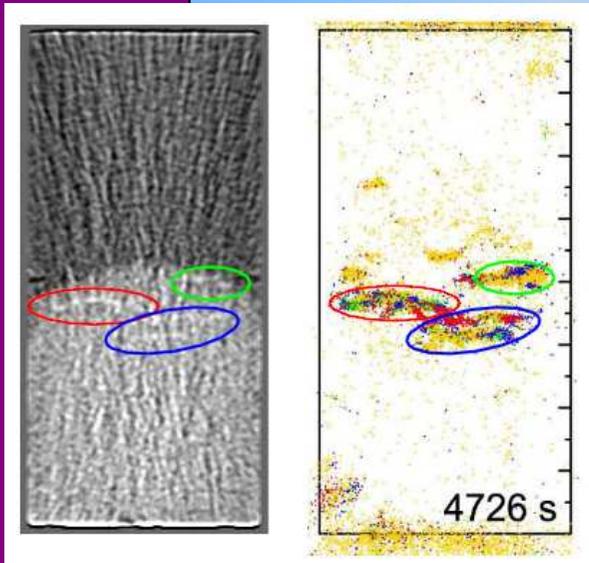


**intact**

**après essai  
mécanique  
avec bandes  
de compaction**

# ENDOMMAGEMENT MECANIQUE :

## bandes de compaction

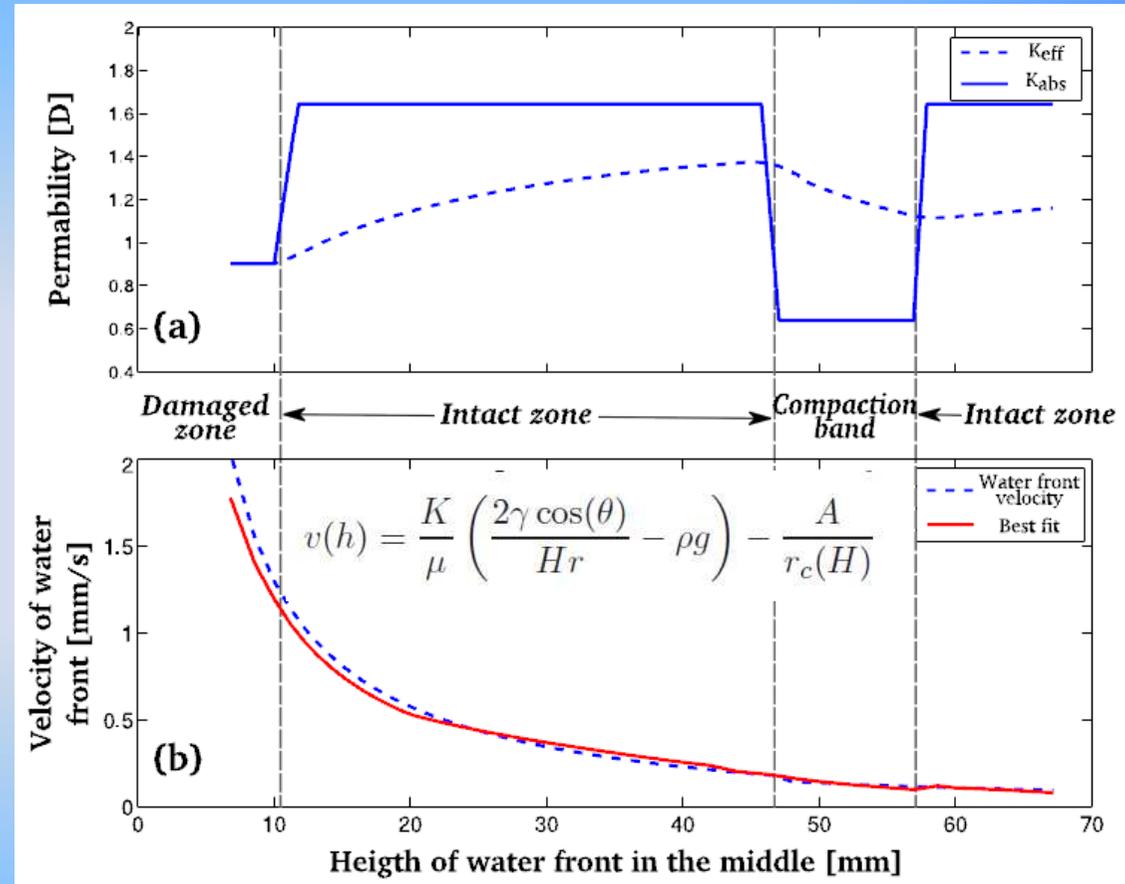
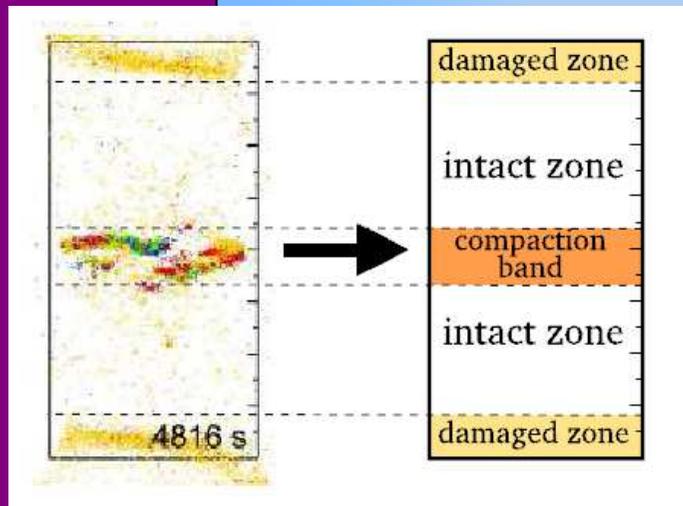


au passage de la zone des bandes de compaction :

- *modification de la cinétique d'imbibition*
- *modification de la géométrie du front capillaire.*

# ENDOMMAGEMENT MECANIQUE :

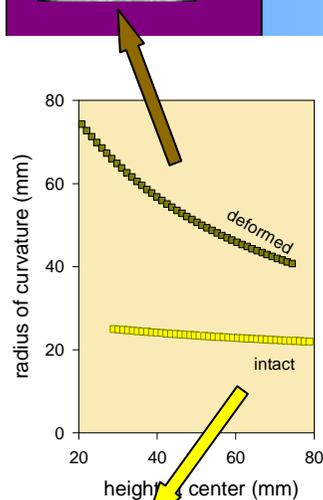
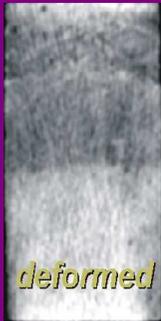
## bandes de compaction



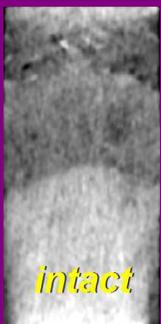
dans la zone des bandes de compaction,  
réduction d'un facteur 3 de la perméabilité

## Conclusion sur l'étude n° 1

**Malgré sa faible résolution, l'imagerie RX avec un scanner industriel demeure un outil intéressant et pertinent pour étudier les écoulements de fluide dans les roches, en temps réel.**



**Elle fournit des informations utiles sur l'hétérogénéité, l'anisotropie et la nature complexe des écoulements dans les roches.**



**L'endommagement mécanique et la déformation localisée ont une forte influence sur les caractéristiques des chemins d'écoulement dans les milieux poreux**

# *Propriétés pétrophysiques de la formation de l'Oolithe Blanche du bassin de Paris*

**Lisa CASTELEYN**

**Beatriz MENENDEZ**

**Philippe ROBION**

**GEC - UCP**



**Pierre Yves COLLIN**

**ISTEP - UPMC**

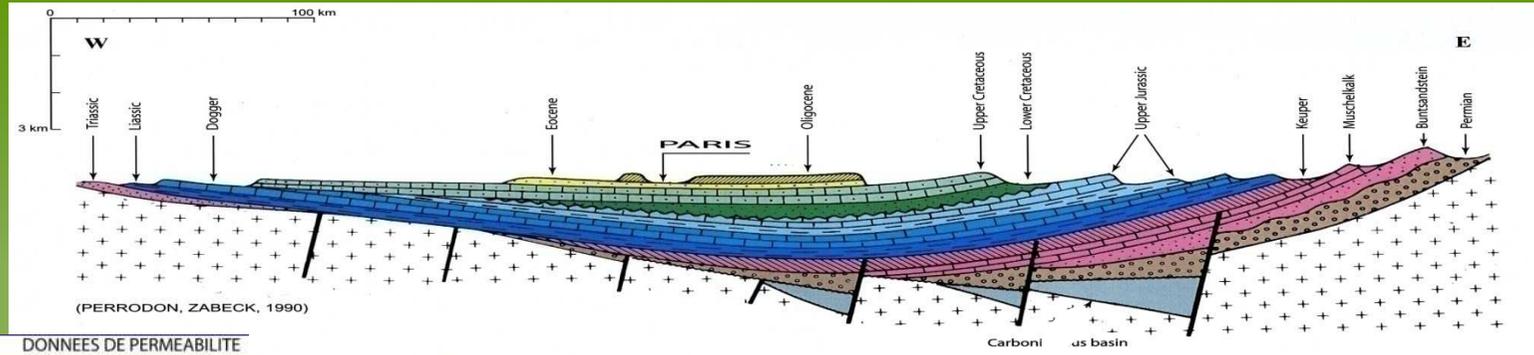


**Nathalie FERNANDES**

**Guy DESAUBLIAUX**

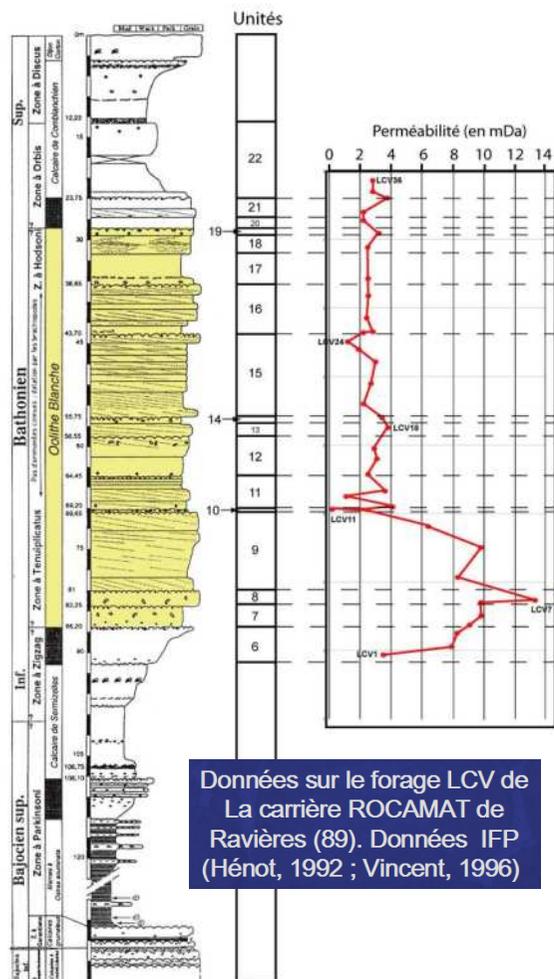
**GDF-SUEZ**





LOG SEDIMENTOLOGIQUE  
(Vincent, 1996)

DONNEES DE PERMEABILITE



Données sur le forage LCV de  
La carrière ROCAMAT de  
Ravières (89). Données IFP  
(Hénot, 1992 ; Vincent, 1996)

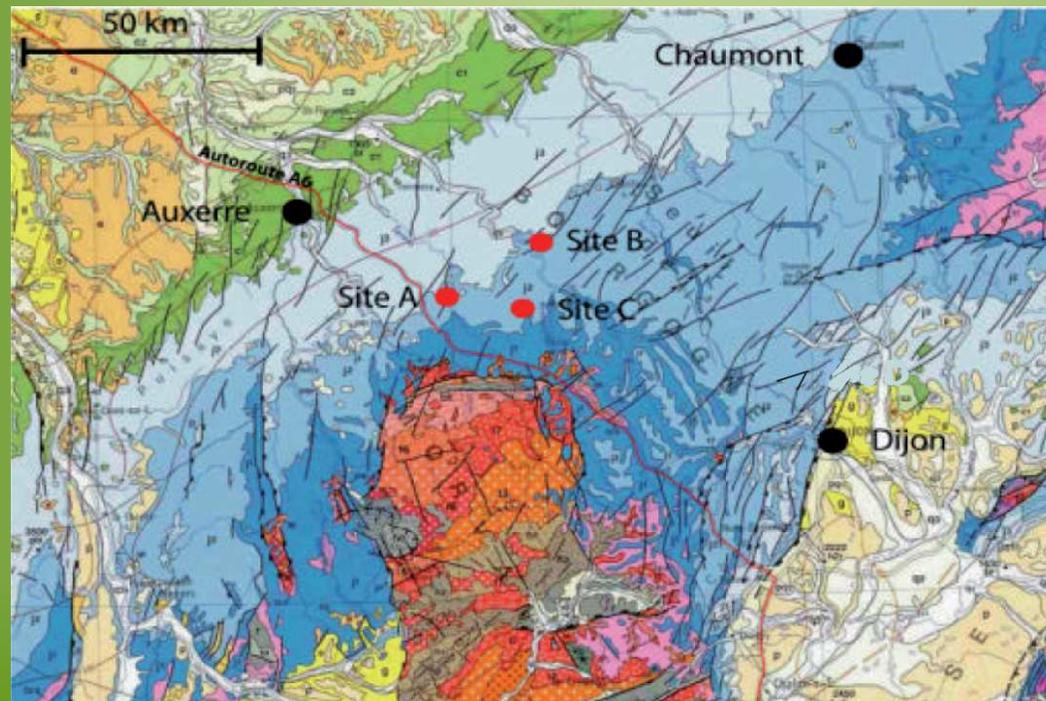
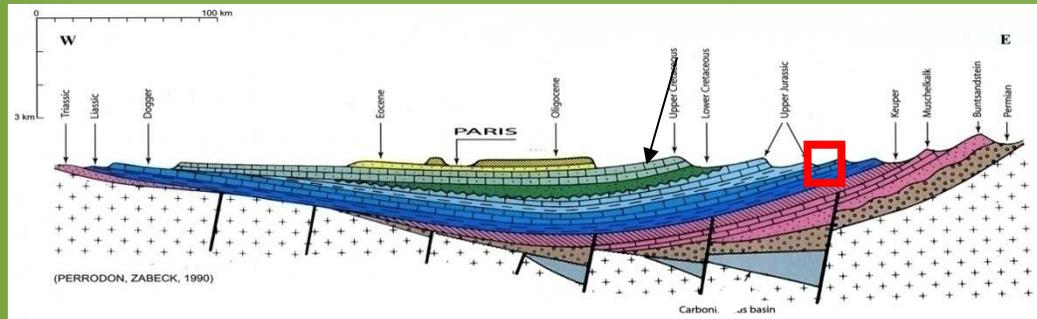
## Caractéristiques de l'Oolithe Blanche :

- Âge : Dogger (Bathonien)
- Profondeur : 0 m à 1900 m
- Epaisseur : 70 à 80 m

## QUESTIONS POSEES

- Quel est la nature du réservoir ?
- Quel est le rôle de la microporosité et de la macroporosité ?
- Quels sont les liens entre la sédimentologie, les microstructures et les données pétrophysiques ?

# La formation de l'Oolithe Blanche à l'affleurement



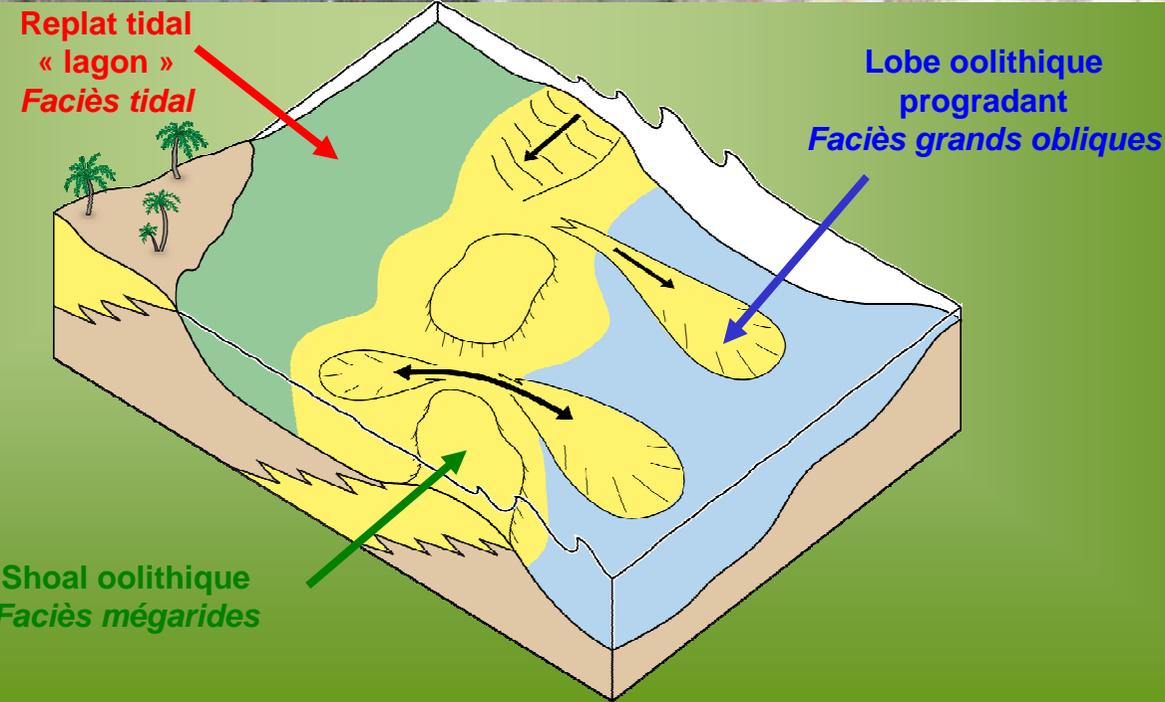
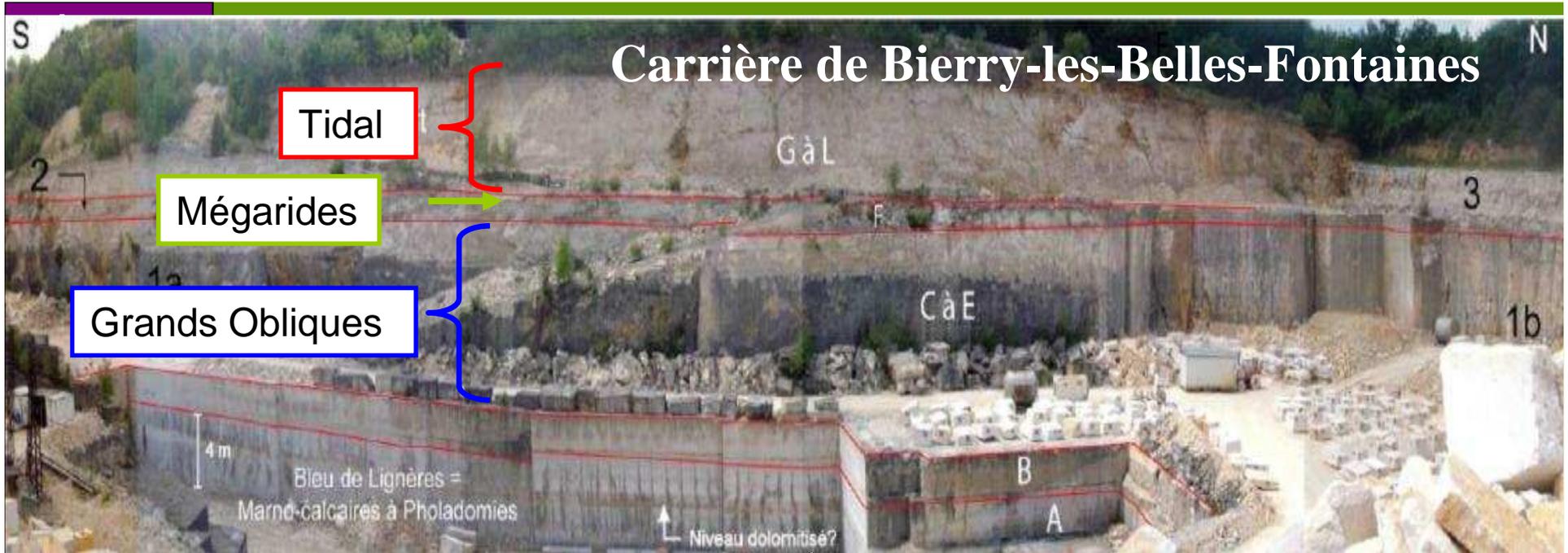
## Sites d'étude :

**3 carrières en  
Bourgogne**

**A : Massangis**

**B : Ravières**

**C : Bierry-lès-Belles-  
Fontaines**



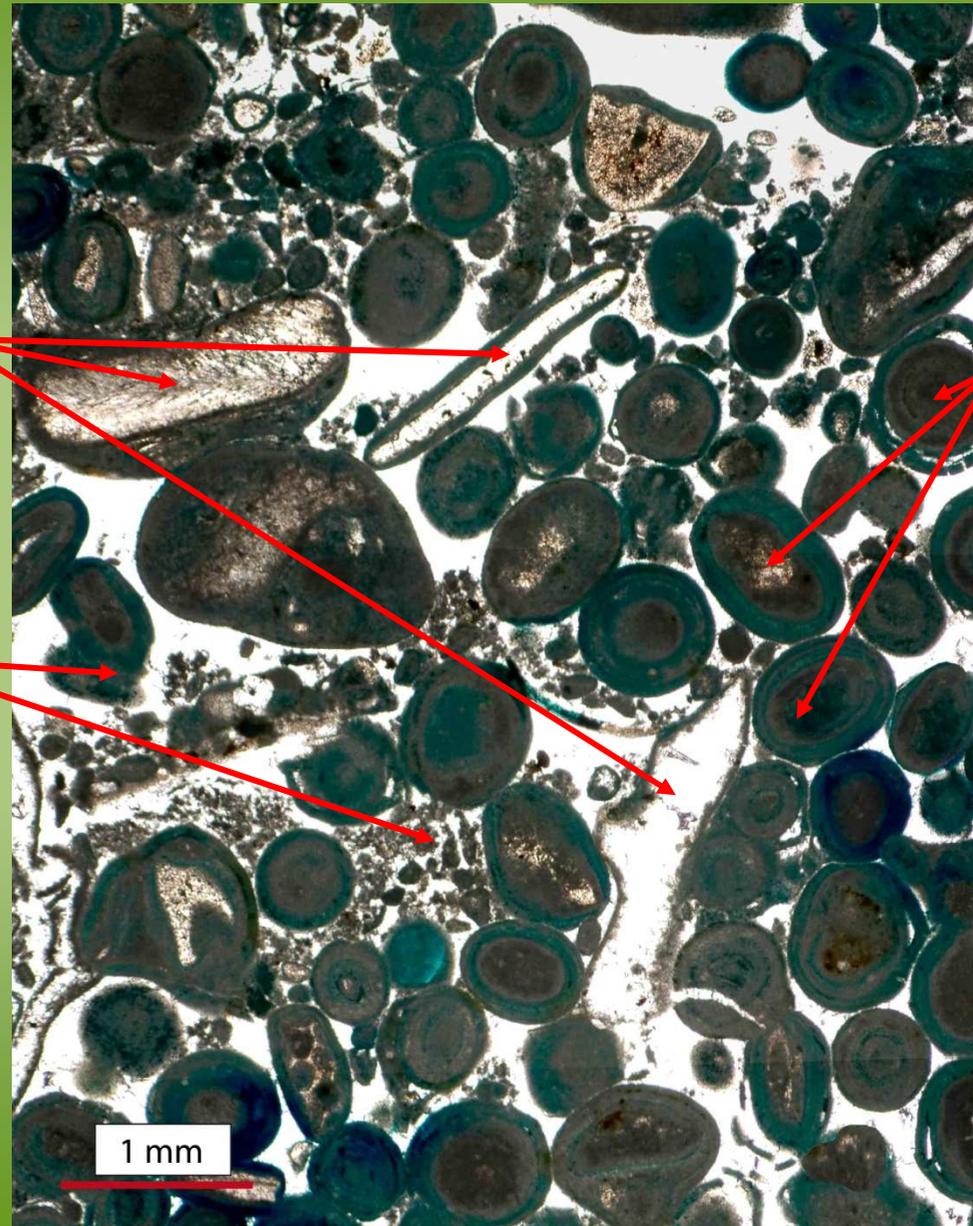
**Modèle sédimentologique de la formation de l'Oolithe Blanche**

# Microstructures de l'Oolithe Blanche

Bioclastes

Oolites

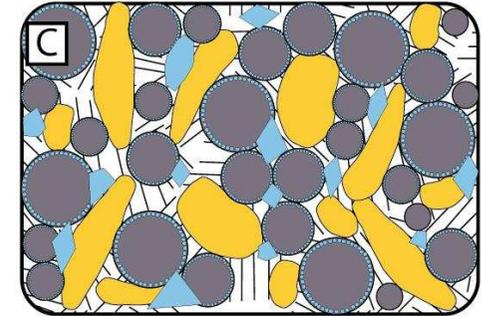
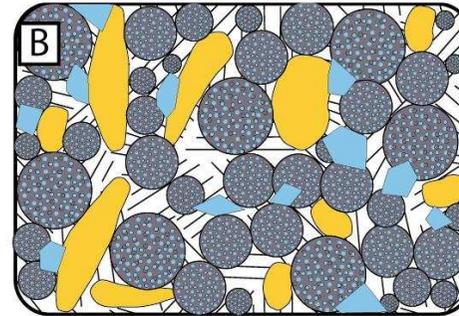
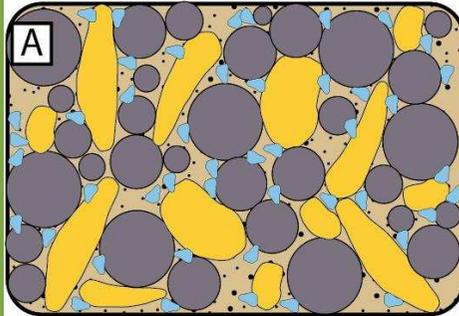
Pellets



1 mm

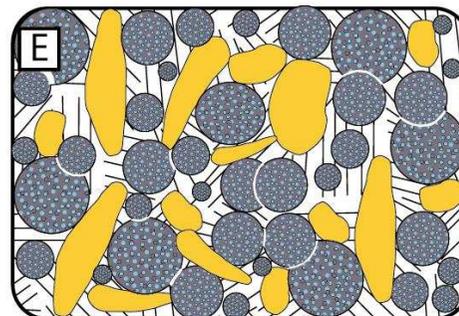
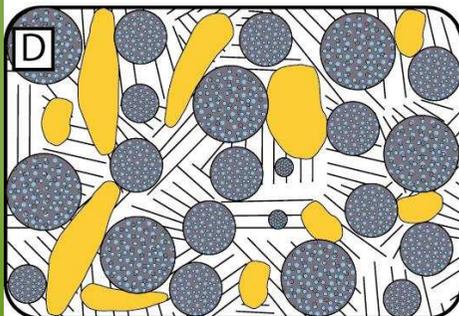
# Modèles pétrophysiques - sédimentologiques

## Faciès grands obliques



+ Permeability

## Faciès tidal + Faciès mégarides



Elements

- Oolite
- Bioclast

Cements

- Micrite
- Sparite

Porosity

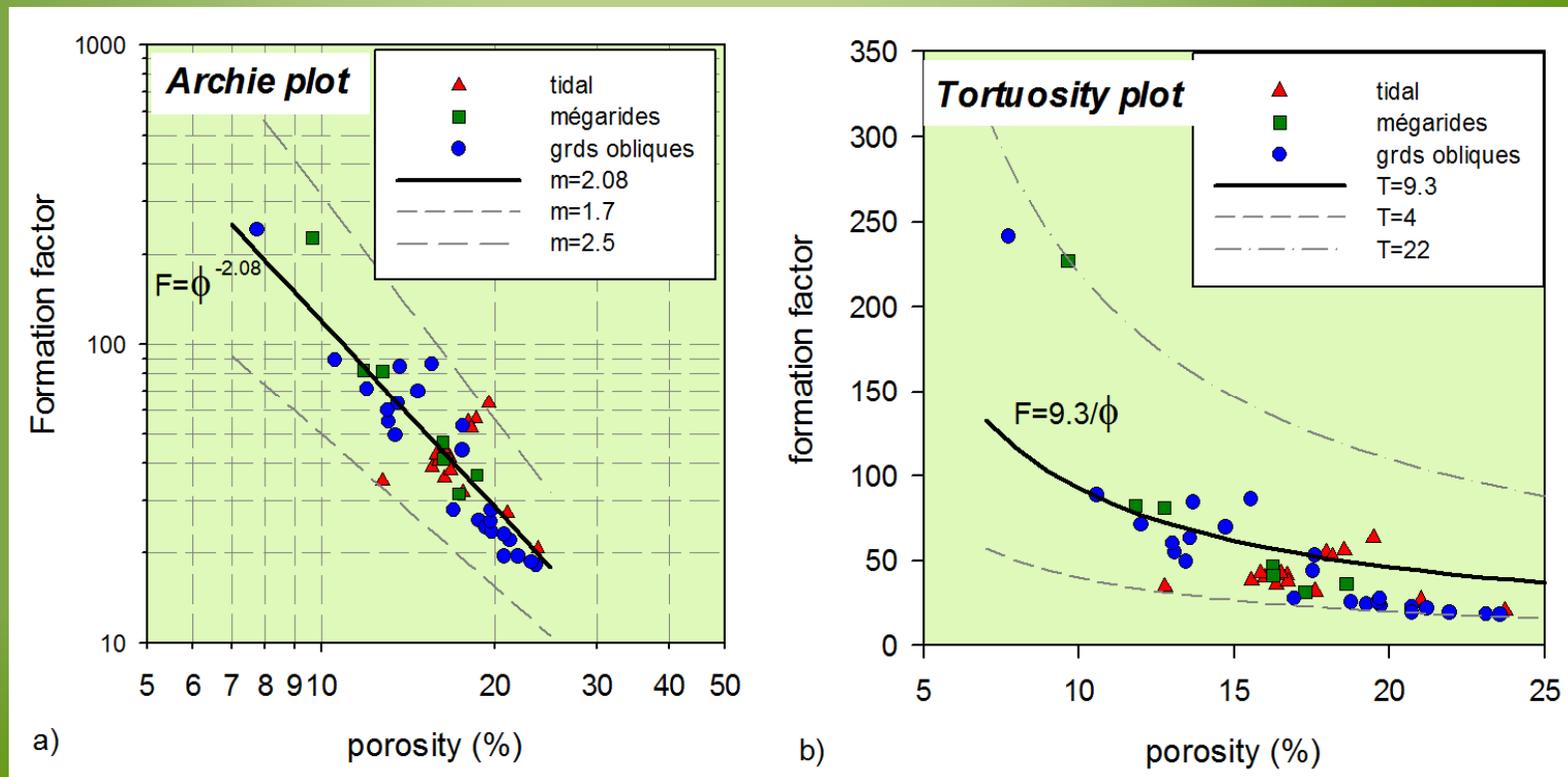
- ▲ Macroporosity
- ▲ Mesoporosity
- Microporosity
- Homogeneous
- Circular

# Mesures de conductivité électrique

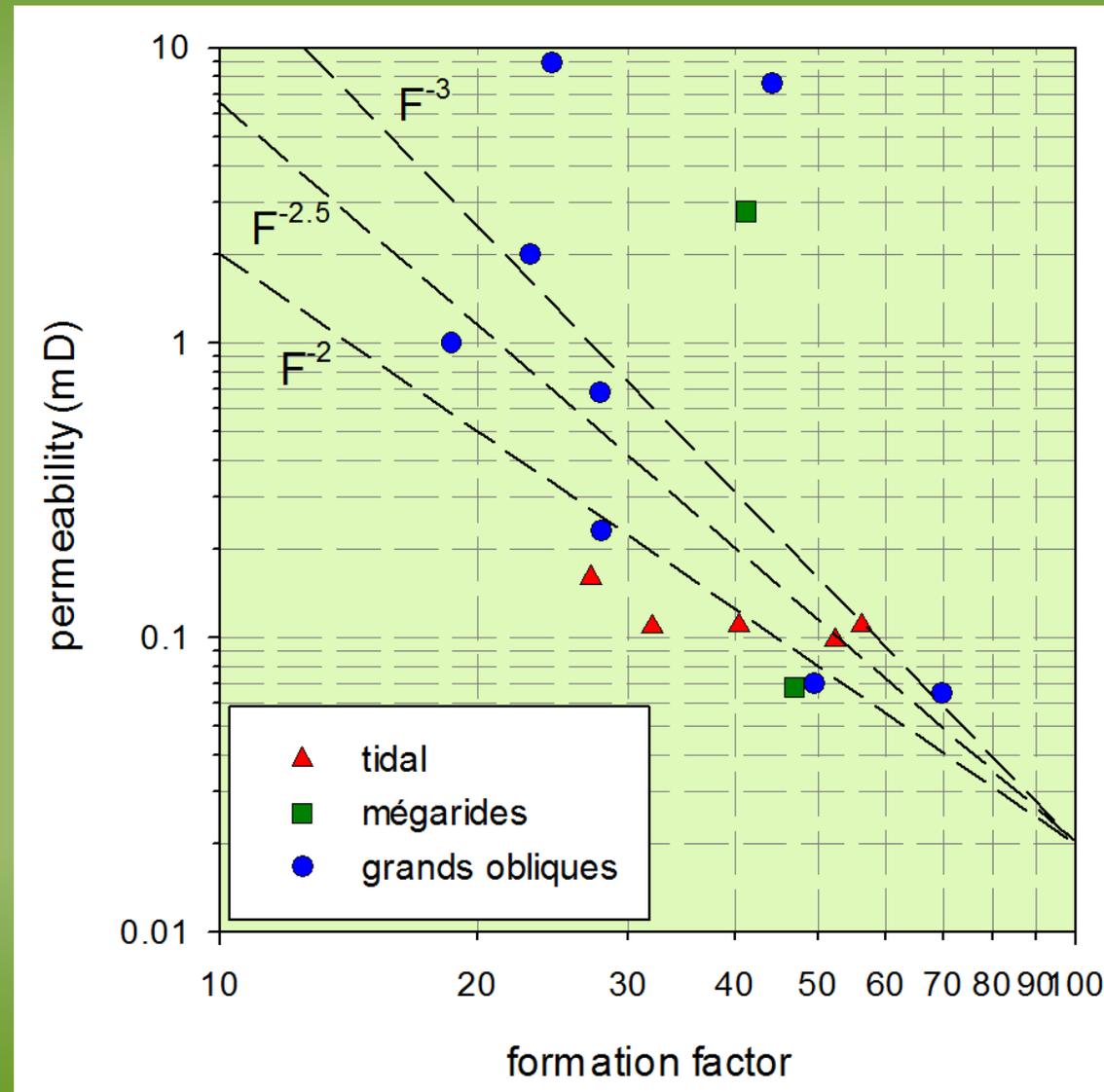
$$\sigma_r = (1/F)\sigma_f + \sigma_s$$

**F : facteur de formation**

**$\sigma_s$  : conductivité de surface**



# Mesures de perméabilité



# Modèles de perméabilité

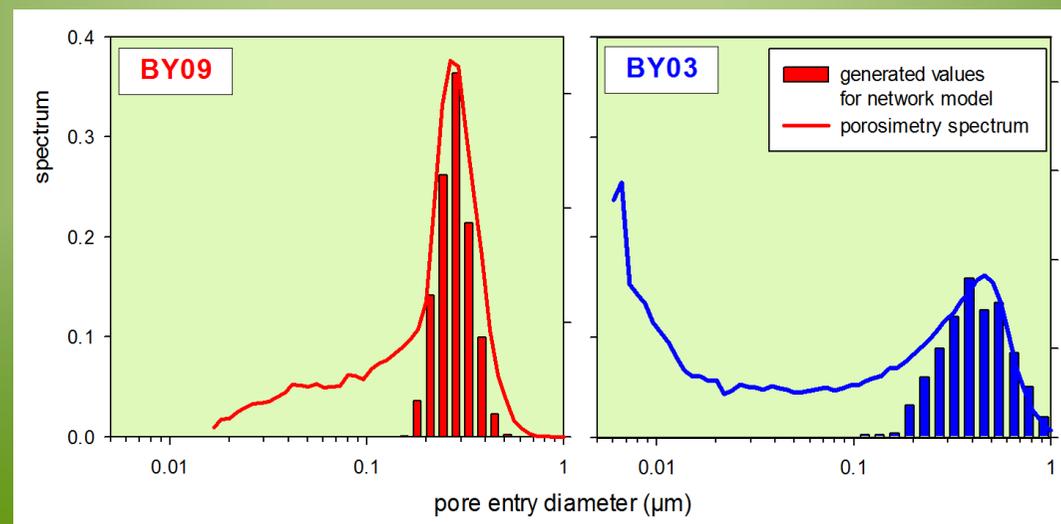
## 3 Modèles pour estimer la perméabilité ont été testés

1) Modèle de Katz & Thompson (1986) → percolation

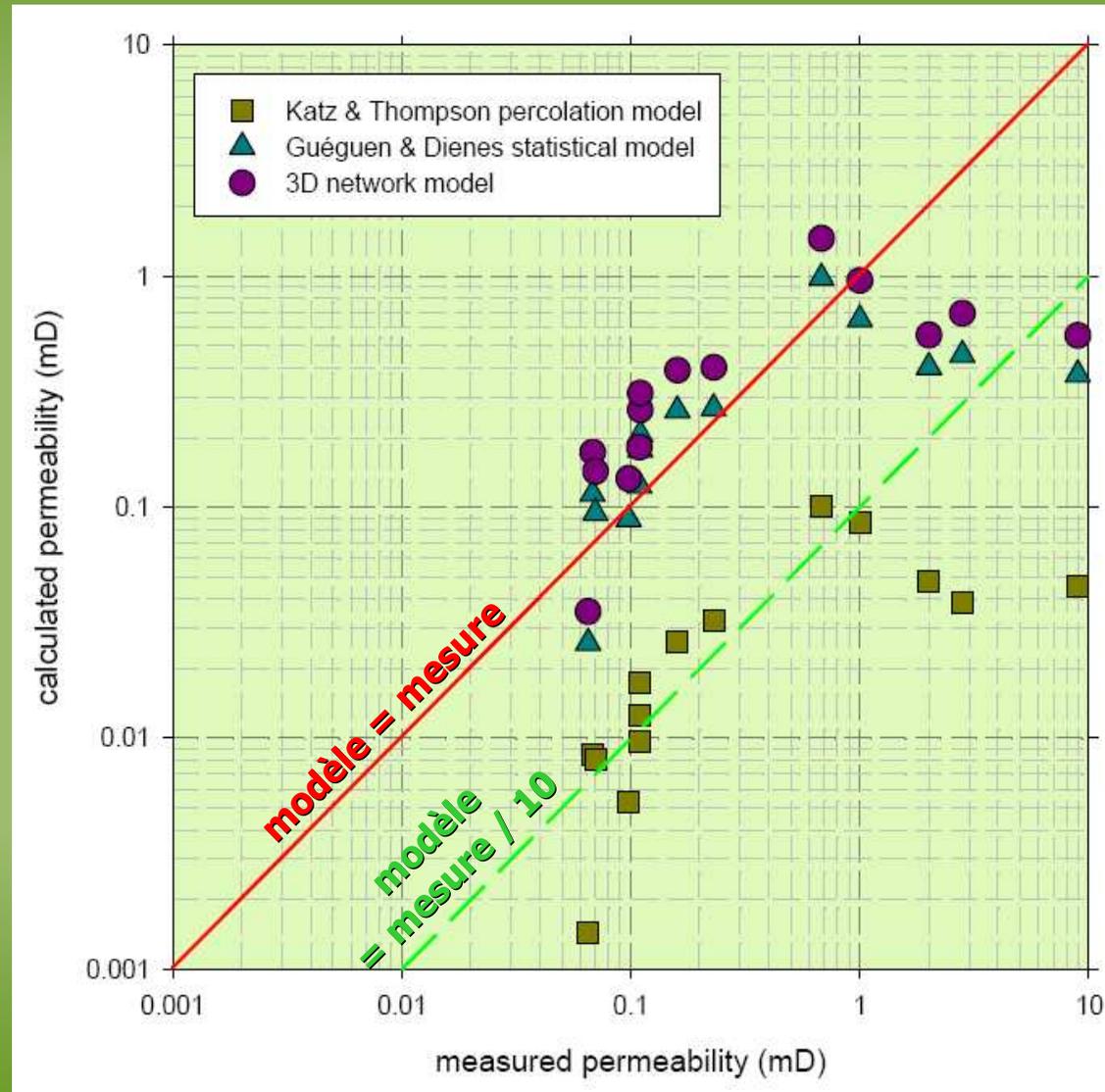
2) Modèle de Guéguen & Dienes (1989) → statistique

3) Modèle de réseau 3D de tubes → numérique

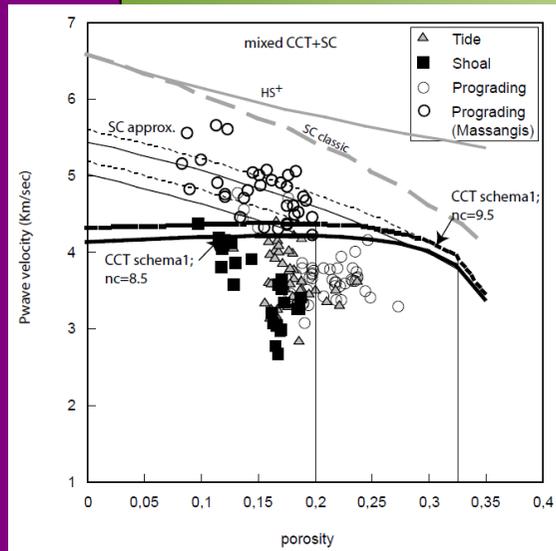
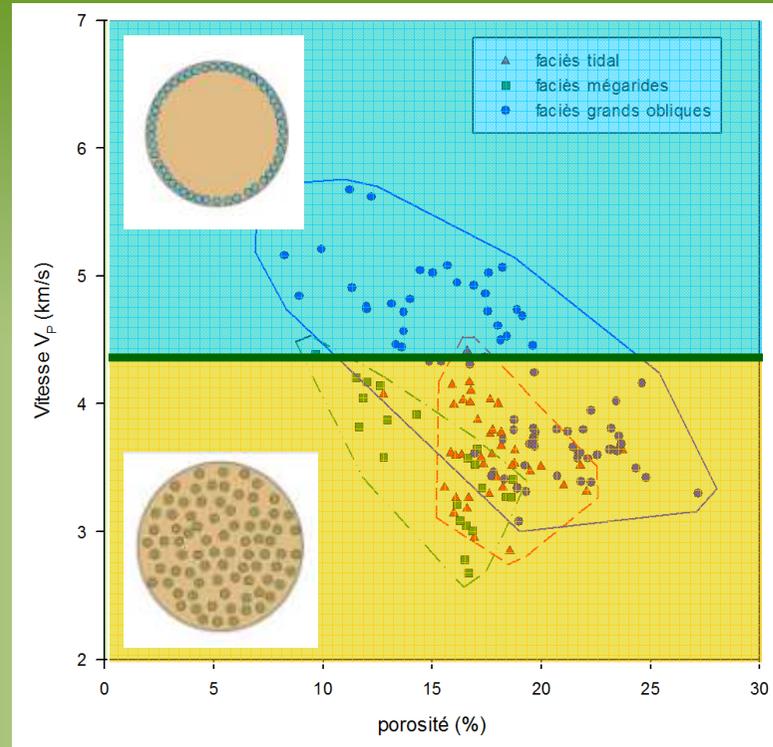
Dans les 3 cas, les paramètres des pores sont donnés  
par la porosimétrie au mercure



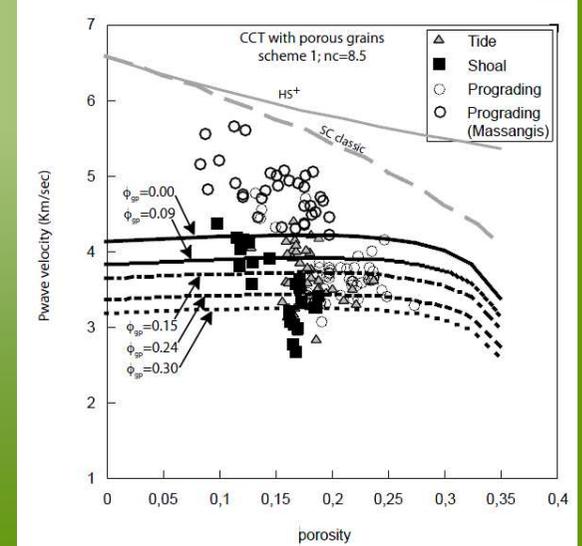
# Modèles de perméabilité



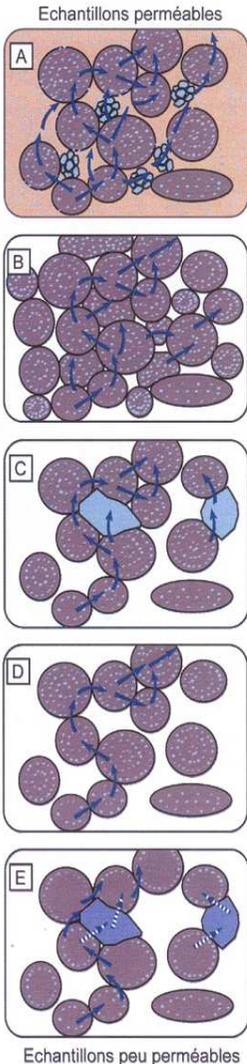
# Mesures de vitesses d'ondes P



**Modèles de milieux effectifs**  
**Modèles de contacts cimentés**  
**Modèles mixtes**



PERMEABILITE



# Conclusions sur l'étude n° 2

La formation de l'Oolithe Blanche est un réservoir microporeux à faible perméabilité  
 $8\% < \text{porosité} < 24\%$   
 $0,06 \text{ mD} < \text{perméabilité} < 8 \text{ mD}$

Malgré la complexité des microstructures, les propriétés de transport suivent les lois classiques en pétrophysique

La situation est plus complexe pour les propriétés élastiques car un seul modèle ne peut pas rendre compte des données

