

Extension du domaine de l'In Situ Recovery (ISR) : application aux réservoirs peu perméables et fracturés

Sébastien Hocquet, Thierry Lefebvre, Olivier Gerbeaud, Anthony Le Beux

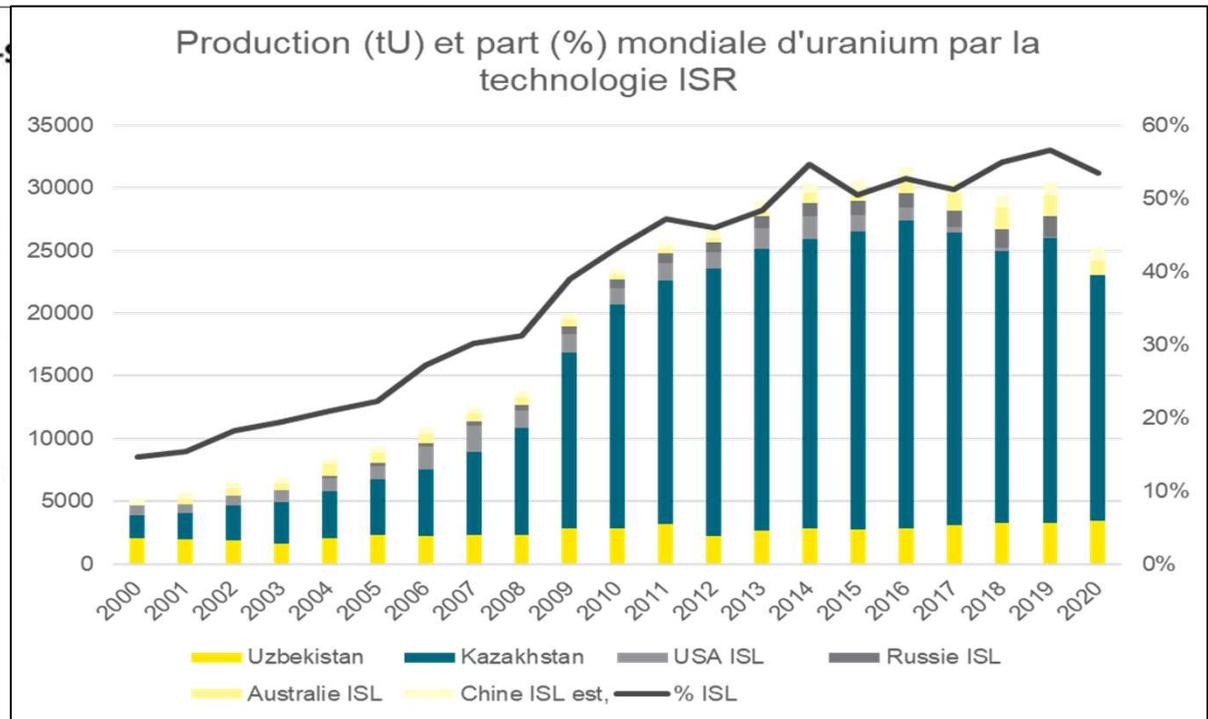
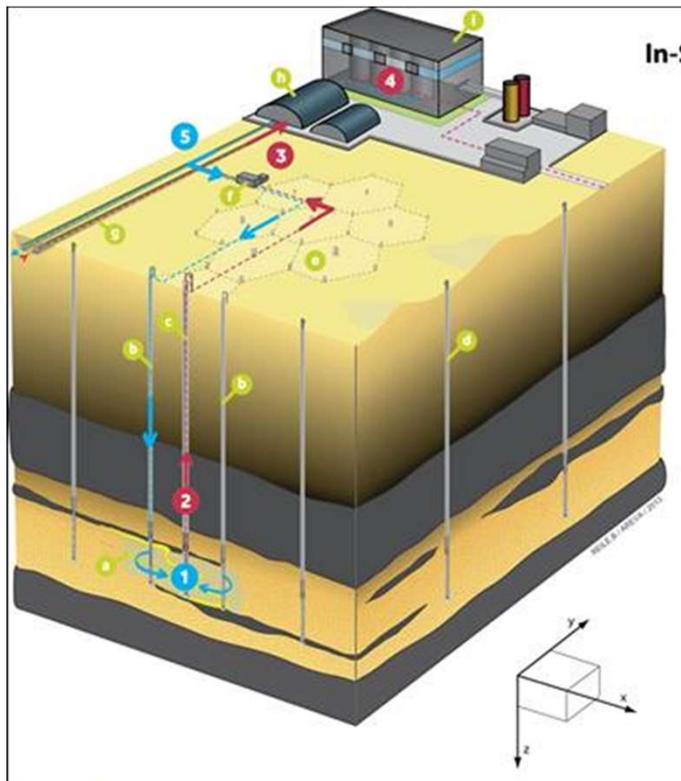
Journées Uranium, le 20 Janvier 2022

IDF-PPT-000637



Années 2000 : le boom de l'ISR au Kazakhstan

L'ISR représente plus de 50% de la production d'U primaire



Le boom de l'ISR Kazakhstan...

Et après ?...

ISR non conventionnel

1. Le développement de l'ISR-cuivre
2. Denison Mines aux avant-postes sur l'ISR en Athabasca
3. Les challenges
4. Imouraren

ISR non conventionnel

- 1. Le développement de l'ISR-cuivre**
2. Denison Mines aux avant-postes sur l'ISR en Athabasca
3. Les challenges
4. Imouraren

San Manuel, AZ plus de 100 000 tonnes de cuivre produites par ISR

Oui, mais...

Fin de vie de l'exploitation San Manuel et Kalamazoo

Production annuelle par ISR seulement de l'ordre de 10000 t

>> Il ne s'agit pas d'une exploitation ISR sensu stricto : la lixiviation et la récupération était faite par forages sur les banquettes de la MCO



Open pit at San Manuel, looking south toward Santa Catalina Mountains on skyline. Broken ground in the far wall resulted from the collapse of surface exposures above the underground block caving operation (Photo by David Briggs, early 1990s).

Autres projets ISR-cuivre en Arizona

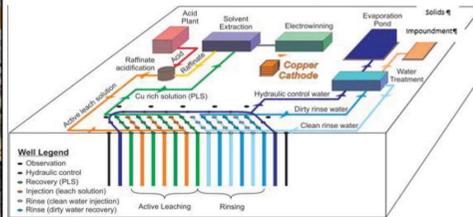
Zones oxydées de gisement faible teneur (~0,5% Cu)

Gunnison :

Minéralisation : zone oxydée d'un skarn

Minéraux Cu lixiviables : chrysocolle, tenorite

Avancement : phase production démarrée en 2020 (première cathode Cu). A date, production en dessous de la cible : effet Covid + difficulté d'injectivité liée au dégazage de CO2



Florence :

Gisement: zone oxydée d'un porphyre

Minéraux Cu lixiviables : chrysocolle, tenorite

Avancement : pilote ISR 2019-2021. Attente autorisation pour production. Montée en production en 2023 ?



>> Projets 100% ISR, mais il faut attendre un peu pour conclure sur le succès de ces projets



Rudna / projet BioMore

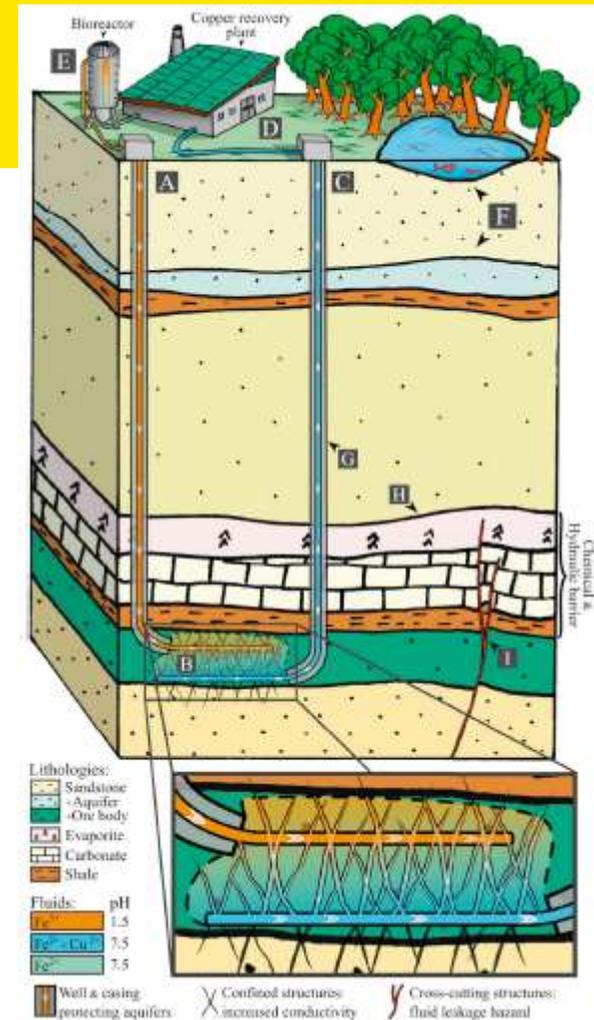
BioMore : développement d'une méthode minière alternative, avec :

- fracturation in situ du minerai
- oxydant pour lixiviation de la minéralisation Cu
- Récupération des solutions par forages

>> TRL encore faible et technique très transformante. Fin du projet en 2018, sans suite sur la mine de Rudna.



Photo KGHM



Laurent et al. (2019)

ISR non conventionnel

1. Le développement de l'ISR-cuivre
- 2. Denison Mines aux avant-postes sur l'ISR en Athabasca**
3. Les challenges
4. Imouraren

Phoenix : 1^{er} projet ISR dans l'Athabasca ?

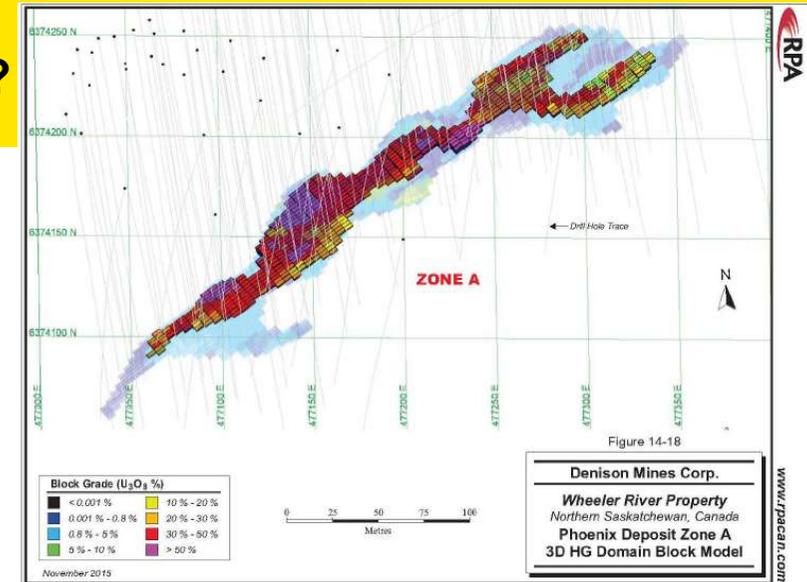
Gisement Phoenix

Découverte et délimitation : 2008-2014

Ressources ~ 27ktU à 15%U, à 420m de profondeur

ISR

Démarrage des études ISR en 2016 :

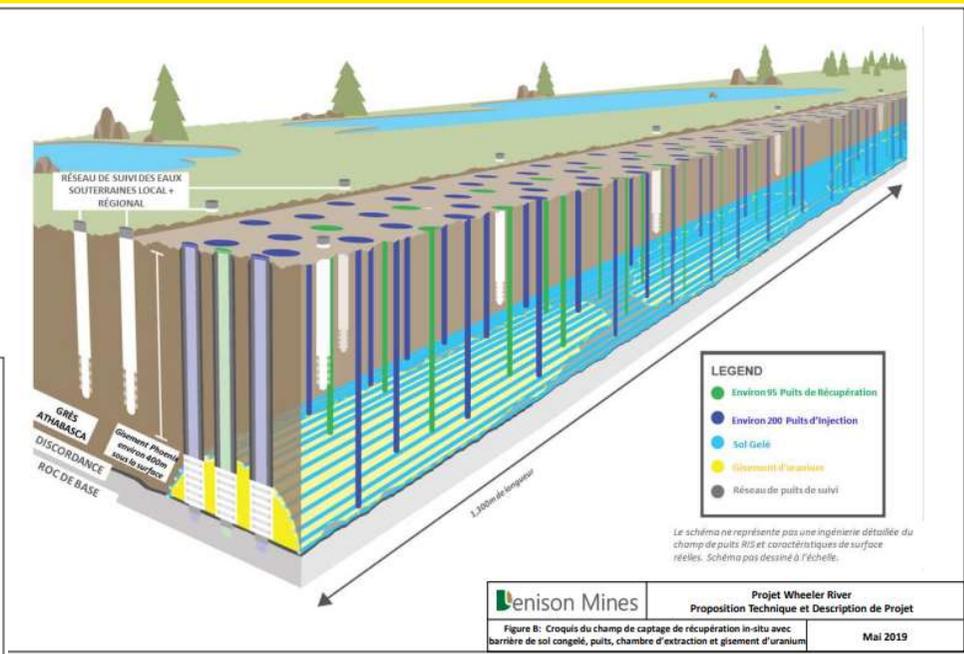
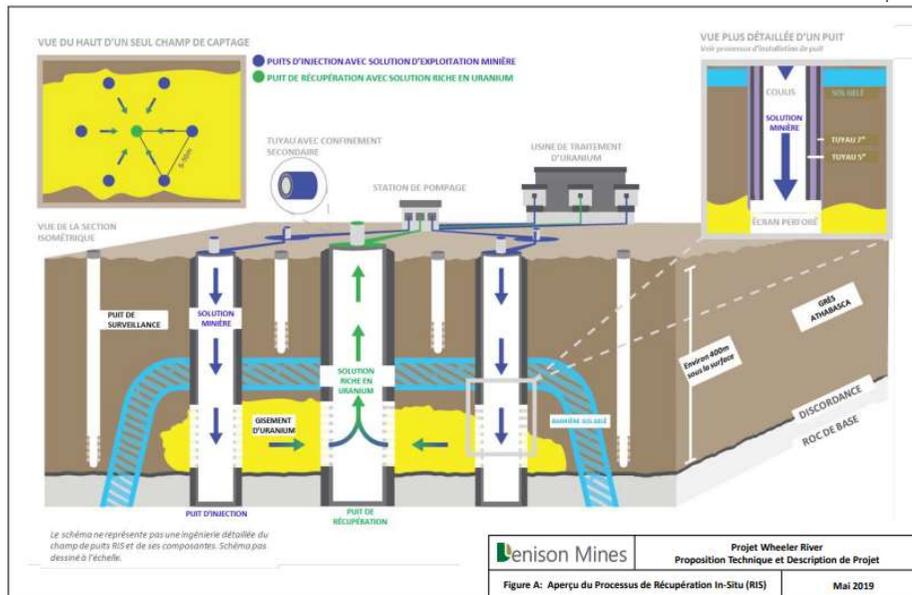


	2016-2018	2019	2020	2021	2022
Faisabilité technique	pré faisabilité	Tests hydrogéologiques et métallurgiques			
Environnement et processus réglementaire		Lancement de l'EIE	Projet révisé (dec. 2020)	Révision du projet pour autorisation test pilote	
Tests ISR					Démarrage test pilote ISR



Phoenix ISR : les challenges

- Perméabilité/porosité et lixivibilité du minerai
- Confinement des solutions
- Réglementation et acceptabilité



>> pour Orano : important de suivre l'avancée du projet de Denison Mines



ISR non conventionnel

1. Le développement de l'ISR-cuivre
2. Denison Mines aux avant-postes sur l'ISR en Athabasca
- 3. Les challenges**
4. Imouraren

Conditions nécessaires pour un projet ISR (applicables pour l'ISR en milieu poreux et ISR non conventionnel)

Conditions techniques indispensables :

1. une minéralisation encaissée dans des formations perméables et saturées en eau
2. un gisement confiné aux épontes par des aquitards
3. des phases porteuses du métal accessibles et non réfractaires aux solutions lixiviantes

>> Ces conditions sont nécessaires mais pas suffisantes pour garantir l'économie d'un projet ISR

Au-delà des challenges techniques et de la maîtrise des coûts, il faut démontrer et convaincre les parties prenantes de la maîtrise de l'impact environnemental

Les challenges de l'ISR non conventionnel

Challenges techniques :

Bien caractériser le gisement, et notamment les paramètres hydrogéologiques

Prédire / modéliser avec suffisamment de précision le processus ISR en phase d'études, avec une incertitude raisonnable :

- Pour des études économiques fiables
- Pour anticiper les risques techniques

Lixivier une partie important du minerai (taux de récupération > 50%) et dans un temps raisonnable

Maitriser l'impact de l'ISR sur les aquifères durant l'exploitation (confinement)

Rétablir, après exploitation, des conditions acceptables de l'aquifère exploité (rémédiation)

Acceptabilité des projets ISR non conventionnels :

Démontrer la maitrise des risques environnementaux, principalement concernant les aquifères

Créer la confiance entre les parties prenantes

La démarche est identique que pour l'ISR conventionnel, mais plus difficile (et + long et + coûteux) d'y arriver pour l'ISR non conventionnel

Perméabilité et porosité

Pour que l'ISR fonctionne et soit économique :

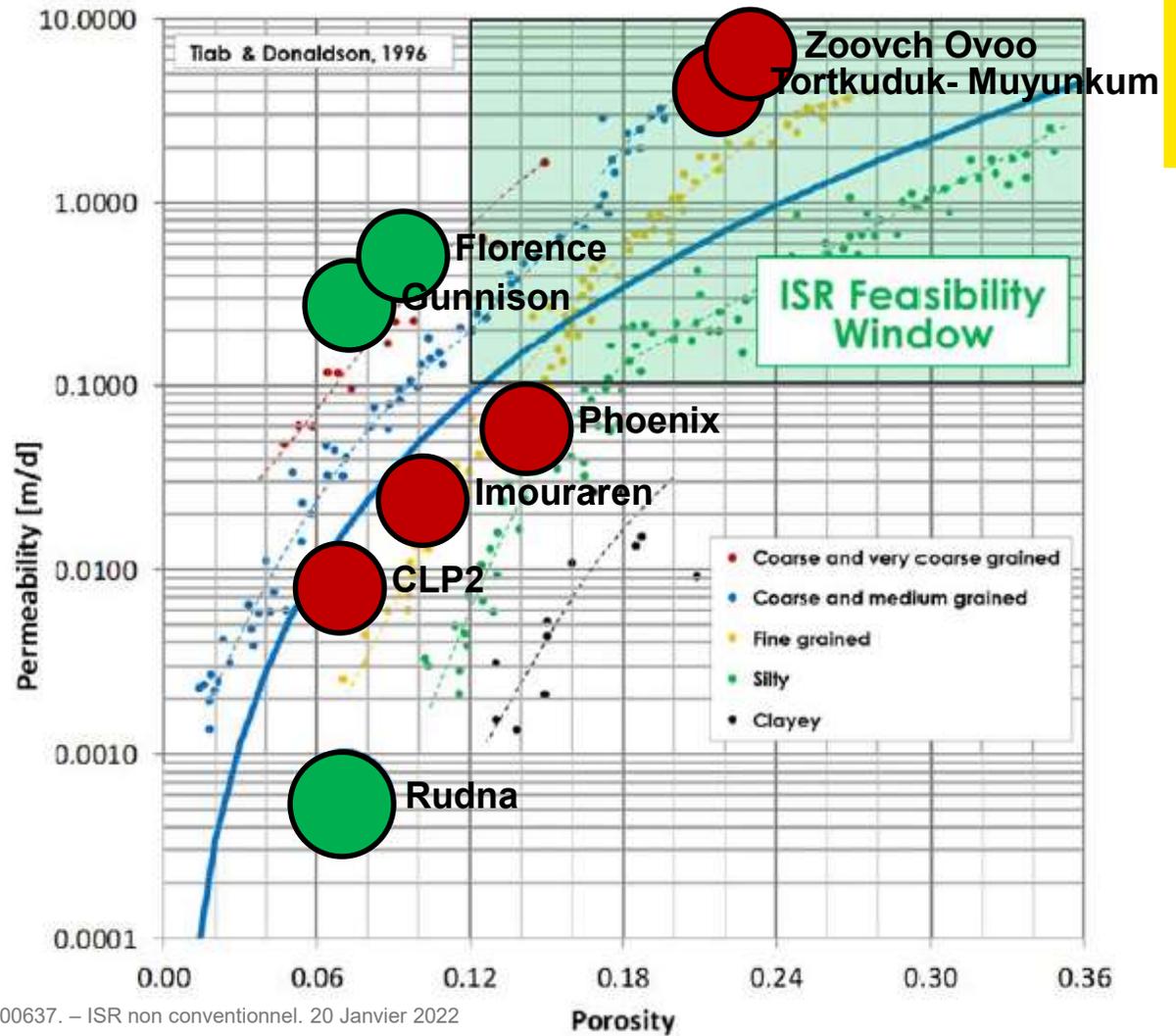
Il faut une perméabilité minimale, mais aussi une porosité connectée

2 axes possibles pour le développement de l'ISR non conventionnel :

- augmentation de la fenêtre de faisabilité de l'ISR (baisse des coûts, gisements fortes teneurs)
- Amélioration les paramètres naturels des gisements

● Projets Cu

● Projets U



ISR non conventionnel

1. Le développement de l'ISR-cuivre
2. Denison Mines aux avant-postes sur l'ISR en Athabasca
3. Les challenges
- 4. Imouraren**

Démonstration de l'applicabilité (et rentabilité) de l'ISR pour Imouraren

Etudes à mener (en cours)

Caractérisation du réservoir minéralisé :

Modèle géologique

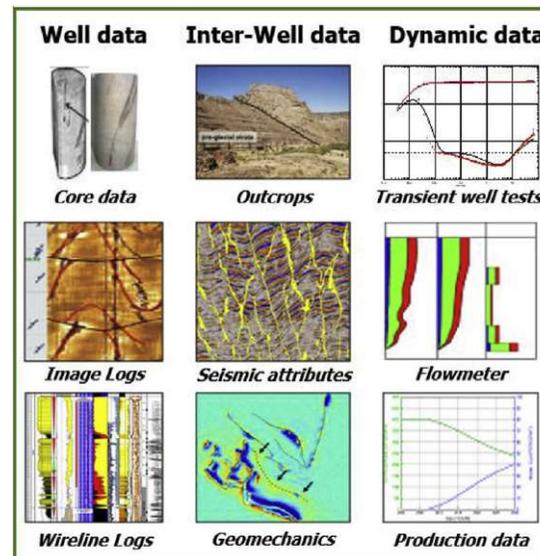
- Objets / hétérogénéité sédimentaires
- Diagenèse
- Modèle structural

Modèle de perméabilité

- Hétérogénéité vertical et spatiale
- Porosité interstitielle vs porosité de fracture
- Porosité libre (connectée)
- Ecoulements

Modélisation

- Réservoir : méthode à adapter en fonction des caractéristiques du gisement



Nosjean et al. (2020)

>> Approche réservoir O&G

Données métallurgiques et environnementales :

Caractérisation du minerai et tests métallurgiques

- Lixiviabilité des minéraux U
- Eléments accompagnateurs et potentiels pénalisants

Etudes sur l'impact environnemental

- Démonstration du confinement
- Méthodes de rémediation de l'aquifère

Modélisation transport réactif :

Scenarios d'exploitation

Simulation impact environnemental

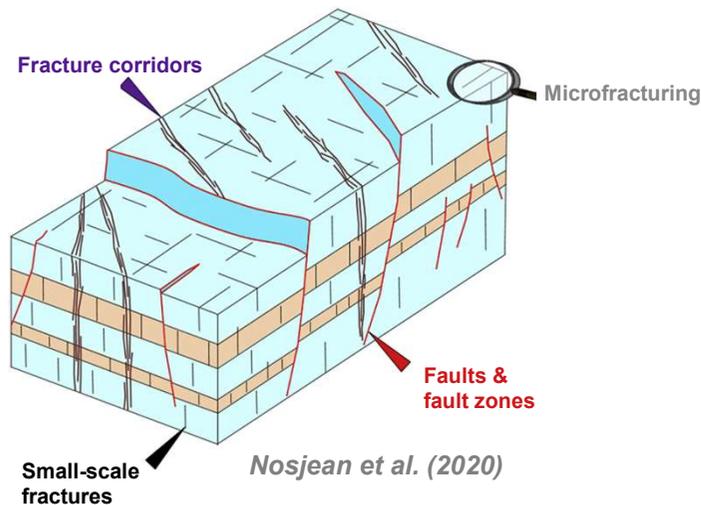
Naturally Fractured Reservoirs

Fractured Sandstone (Tchirezrine 2, Niger)

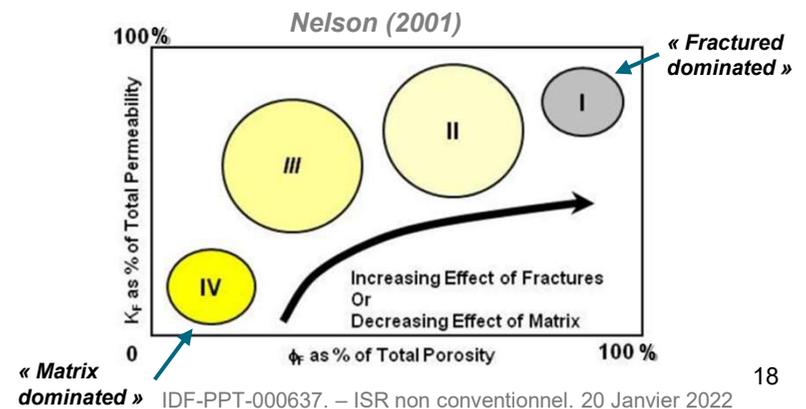


Structural Key parameters:

- Geometry of the fracture system geometry
e.g. Fractures length, spacing, vertical extension, connectivity
- Fractures characteristics
Nature (deformation bands, open joints, veins, etc.)



Fractured Reservoir Classification :

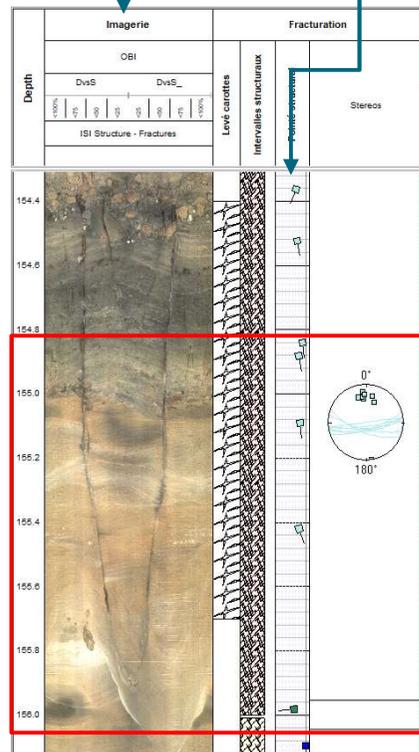


In Situ fracture measurement in wells: Optical Borehole Imaging (OBI)

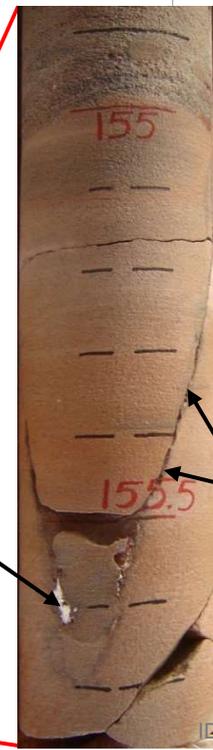
OBI image log

Oriented data picks

3D view of fractures picking

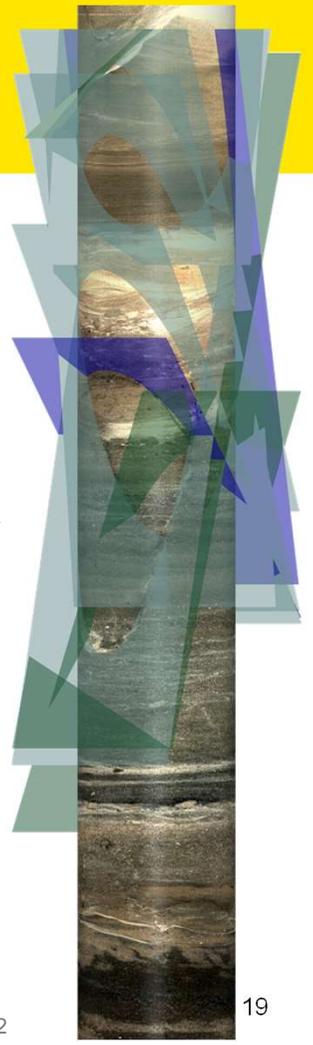
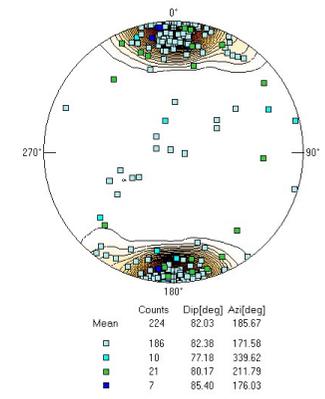


(Core picture)



Carbonate seals

Discontinuous aperture zones



L'ISR non conventionnel...

Un de nos axes de développement : innover pour donner accès à des gisements non conventionnels



orano

Donnons toute sa valeur au nucléaire