

Modélisation inverse des écoulements en zone de faille en milieu carbonaté considérant l'incertitude paramétrique et prédictive

Travaux de thèse

Aurélie Boura

Doctorante en 1^{er} année de Thèse au sein du Laboratoire HydroSciences Montpellier

Directrice :Véronique Leonardi

Encadrant :Yohann Cousquer



SNO KARST 2023



Sommaire

- **Introduction :**

- Les zones de faille en milieu carbonaté fracturé
- Les méthodes de caractérisation hydrodynamique des zones de faille
- Caractériser les **écoulements en zone de faille** pour **améliorer la prédiction** au sein de ces milieux **complexes** et **vulnérables**

- **Méthodologie :**

- Méthode de modélisation inverse: PEST ++ IES/ GLM
- Fonctionnement du modèle inverse:
 - Estimation de K (conductivité hydraulique) de la zone de faille
 - Prédiction réalisée sur la base des estimations de K en zone de faille

- **Résultats sur cas d'étude:**

- La faille du Rieu Coullon

- **Conclusion**

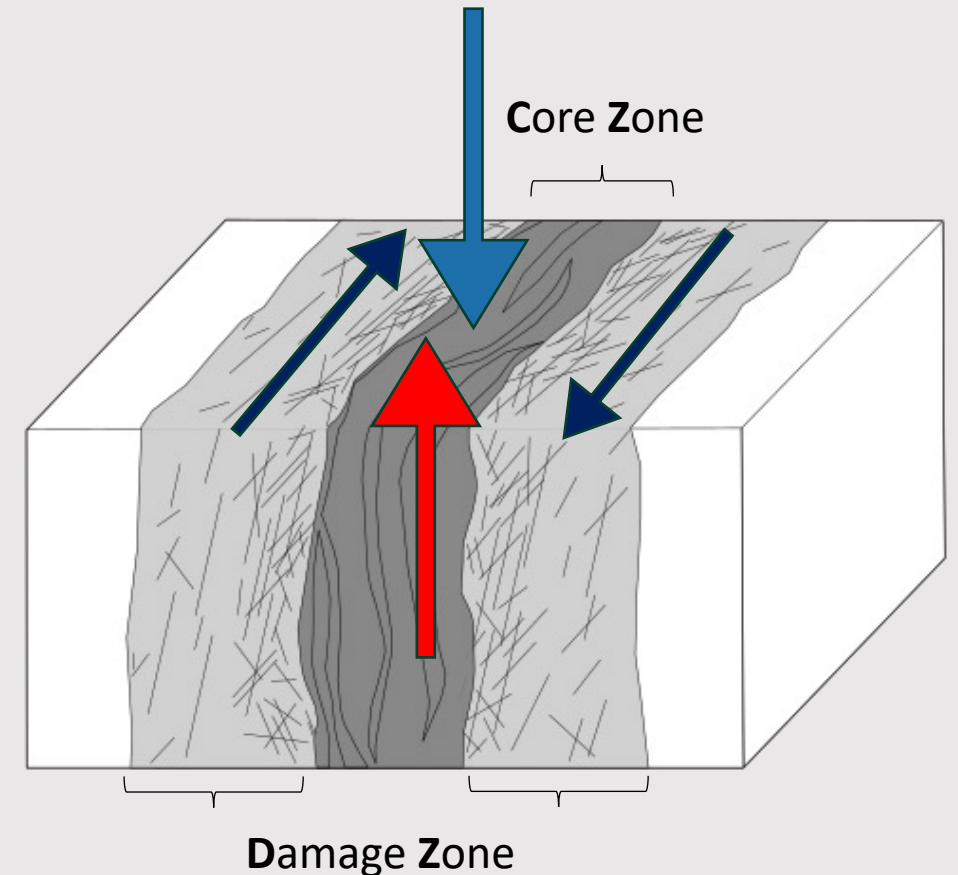
Les zones de faille en milieu carbonaté fracturé

Les écoulements souterrains en zone de faille:

- Conduit/ Barrière (*Caine et al., 1993*)
- Echanges Horizontaux / Verticaux (*Zoback & Kohli, 2019*)

Spécificité au sein des aquifères carbonatés fracturés :

- Faille / fracture = **Axe de développement préférentiel de drain** (*Kiraly, 1975*)
- Effets de **compartimentation**
(*Jourde et al., 2011 ; Leonardi et al., 2012 ; Dausse et al., 2019*)
- **Vecteur d'infiltration préférentiel** (*Mazzilli 2011 ; Dausse, 2015*)



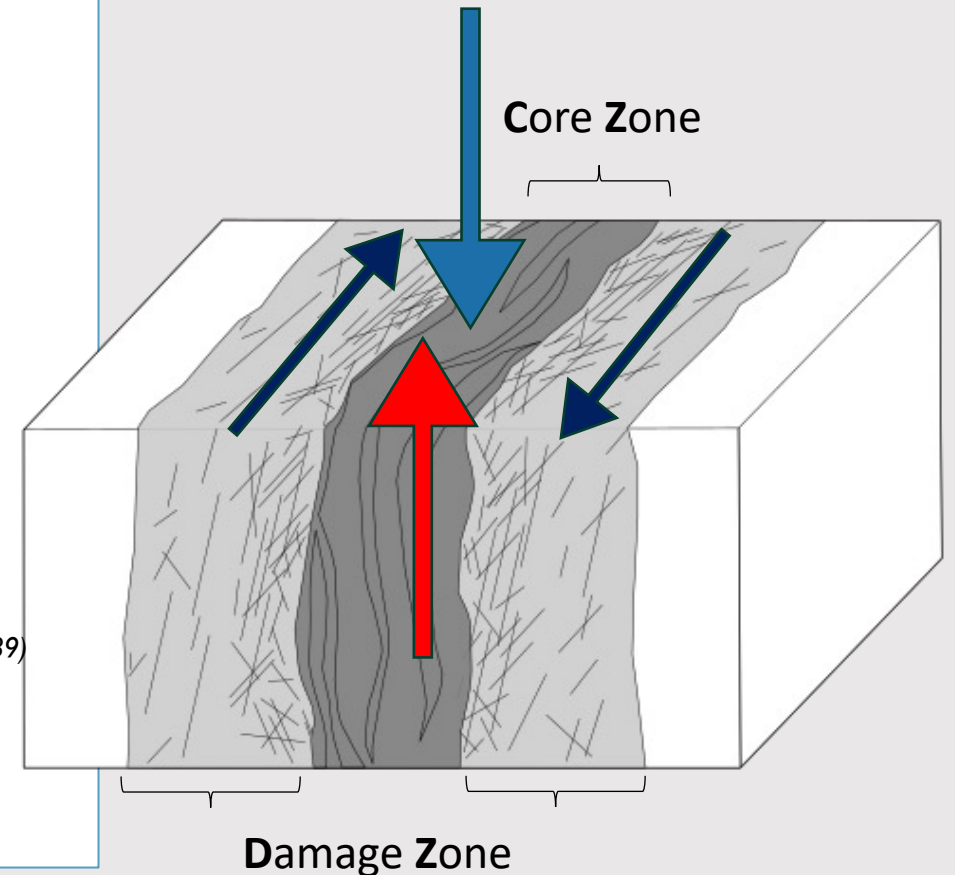
Les zones de faille en milieu carbonaté fracturé

Les écoulements souterrains en zone de faille

Spécificité au sein des aquifères carbonatés fracturés

Enjeux:

- Réservoirs Karstiques > 50% alimentation du pourtour méditerranéen
(Ford & Williams, 1989)
- Gestion **qualitative** et **quantitative** de la ressource en eau souterraine



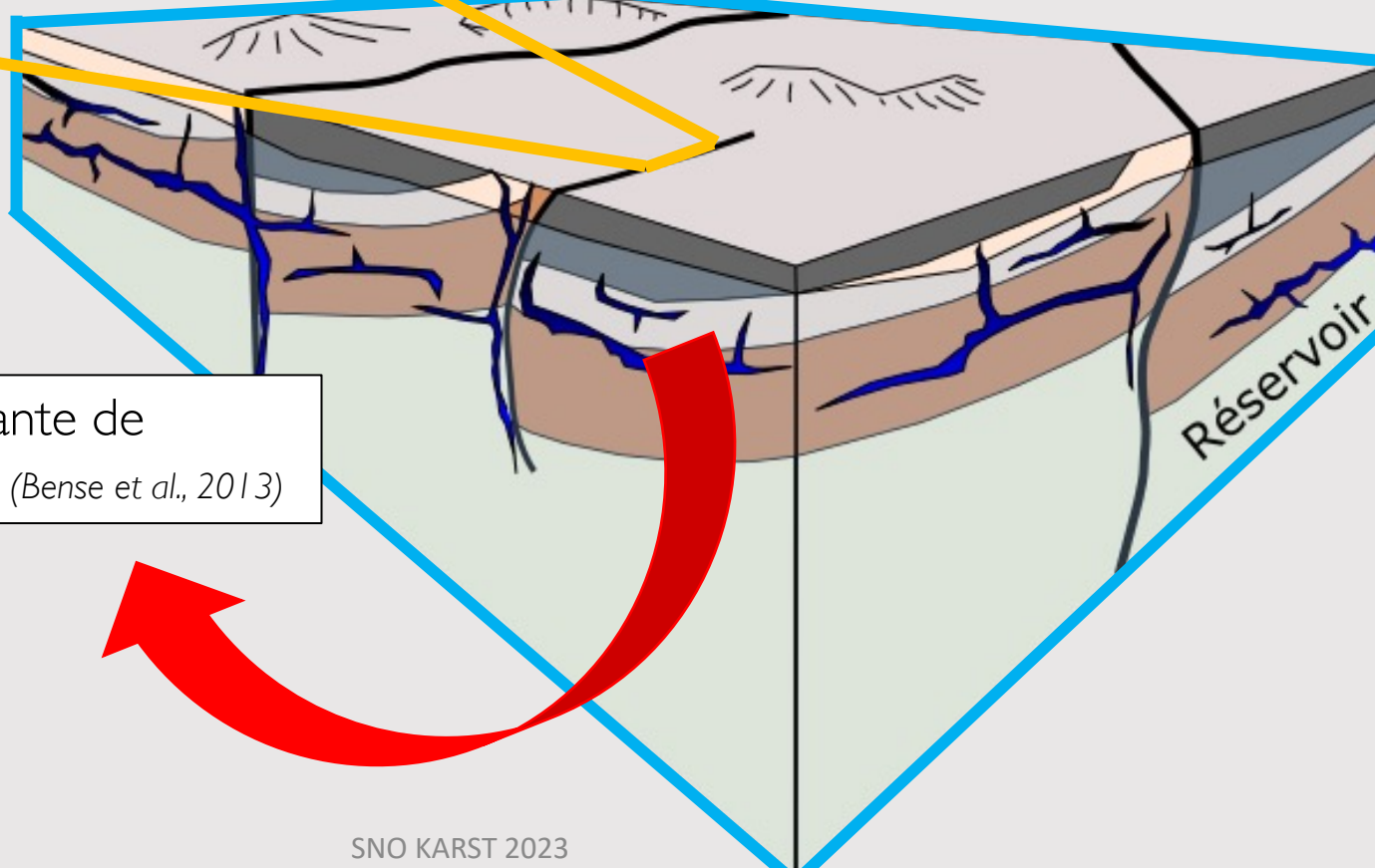
Les méthodes de caractérisation hydrodynamique des zones de faille

Géologie structurale

Etude des structures de la zone de faille
Mesure de perméabilité sur affleurement

Hydrogéologie

Propriétés hydrodynamiques du réservoir



Interprétation dépendante de
l'échelle d'investigation (*Bense et al., 2013*)

Les méthodes de caractérisation hydrodynamique des zones de faille

Géologie structurale

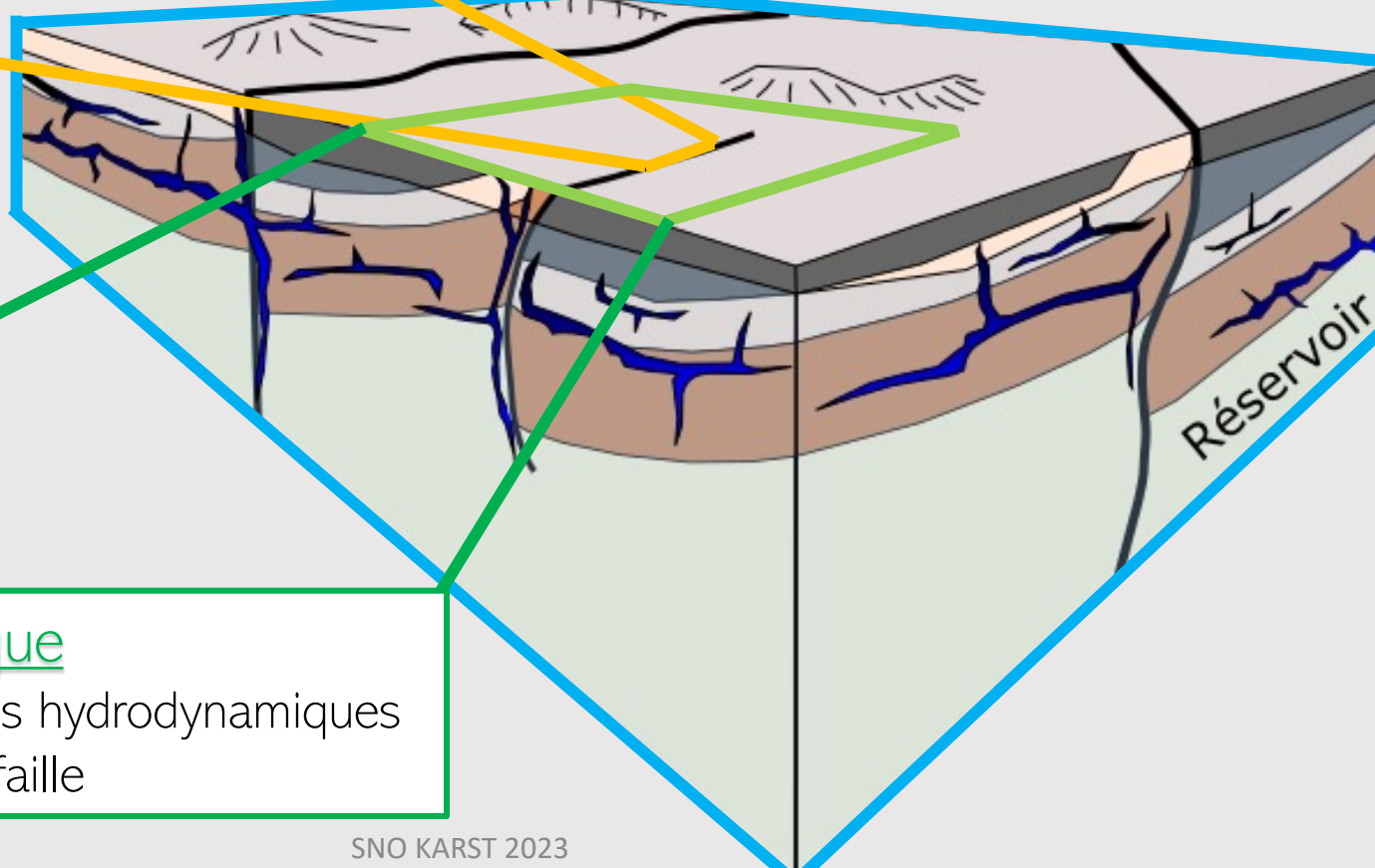
Etude des structures de la zones de faille
Mesure de perméabilité sur affleurement

Hydrogéologie

Propriétés hydrodynamiques du réservoir

Modélisation numérique

Estimation des paramètres hydrodynamiques
À l'échelle de la zone de faille

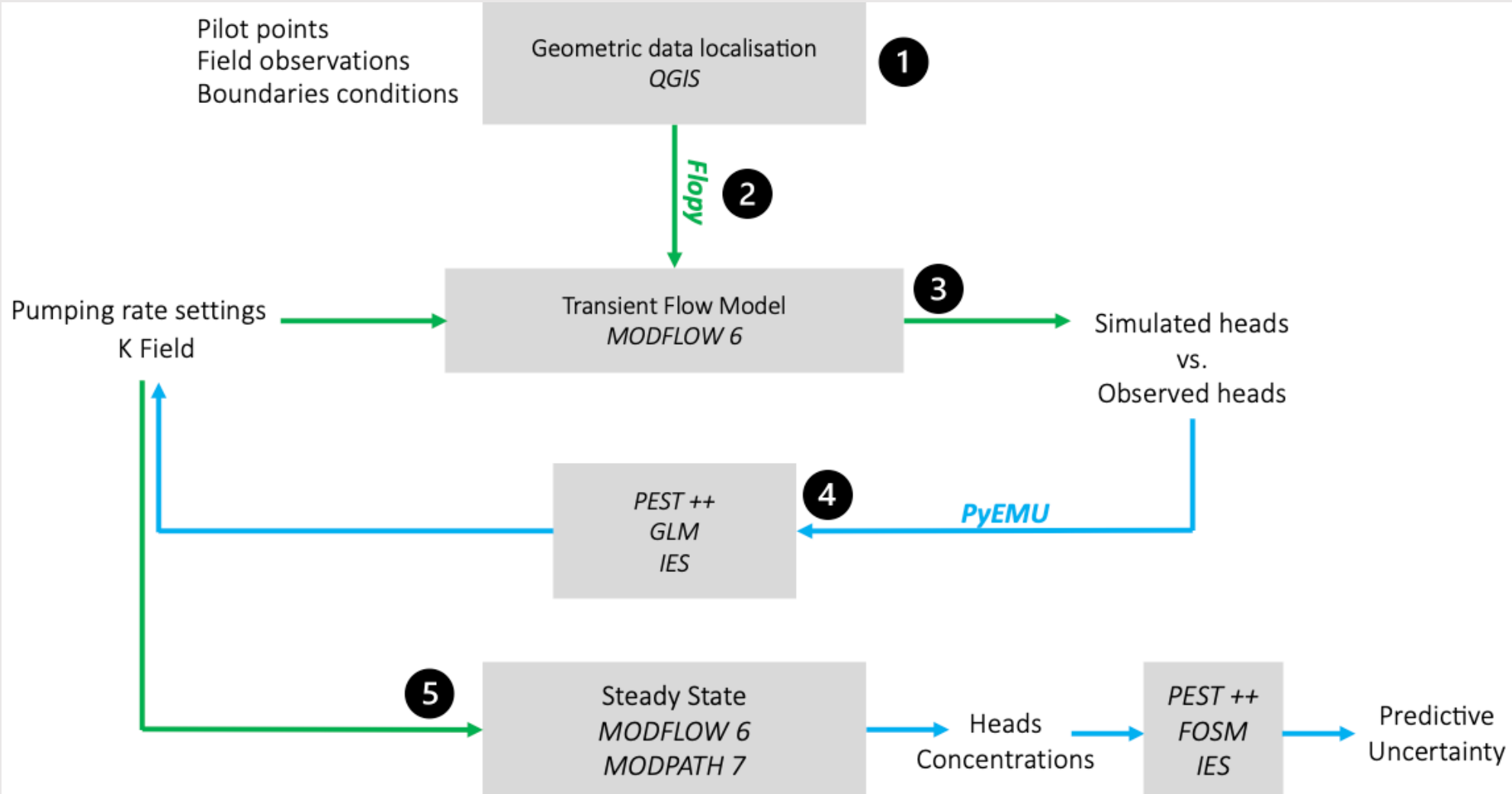


Modélisation inverse

- **Les modèles inverses** : *permettent de déterminer les paramètres inconnus d'un modèle (T,S..) en utilisant les données observées (Zhou et al. 2014)*
- **Les objectifs** :
 - Caractérisation hydrodynamique des zones de faille **sans a priori de départ**
 - Utiliser les connaissances hydrogéologiques / géologiques conjointes
 - Mieux caractériser pour la faire de la **prédiction**
 - **Incertitudes** paramétrique et prédictive

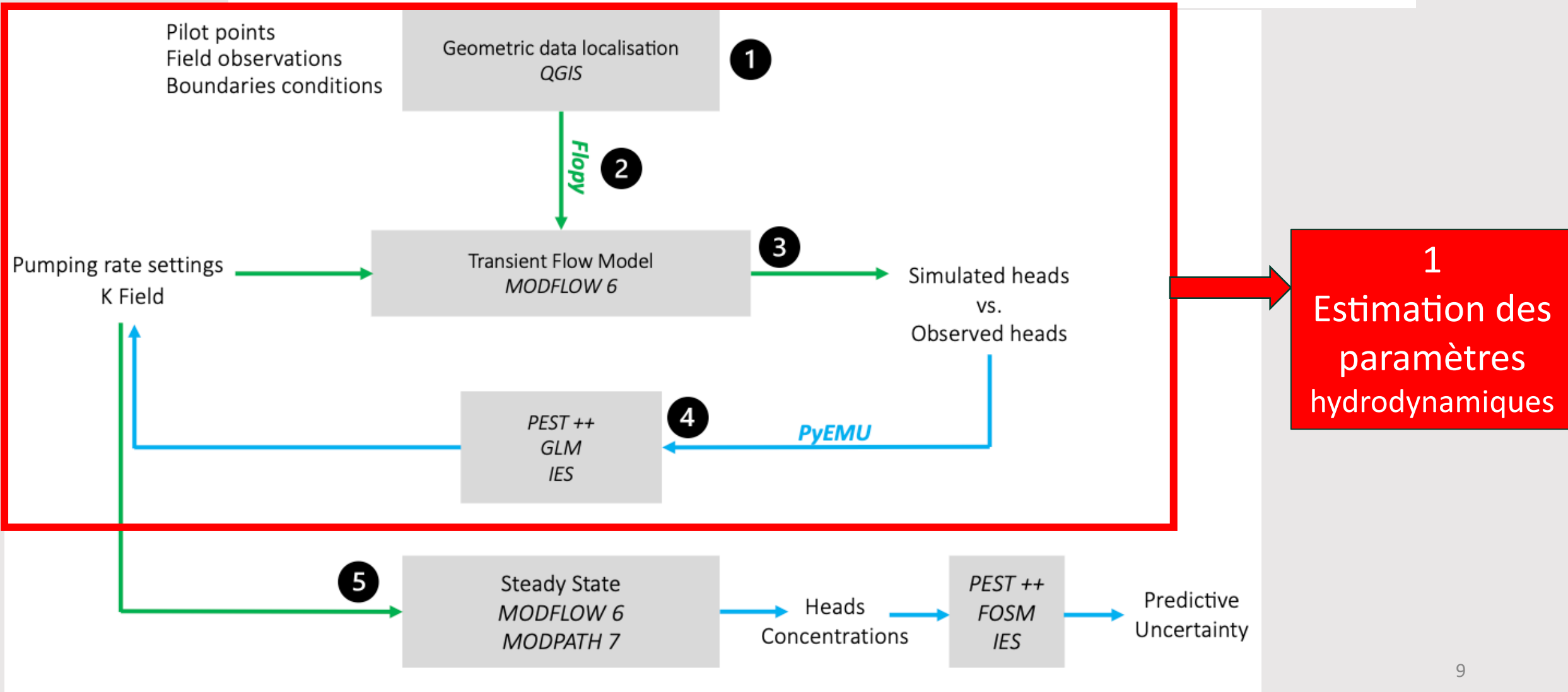
Fonctionnement du modèle inverse développé

(Boura and Cousquer, 2023)

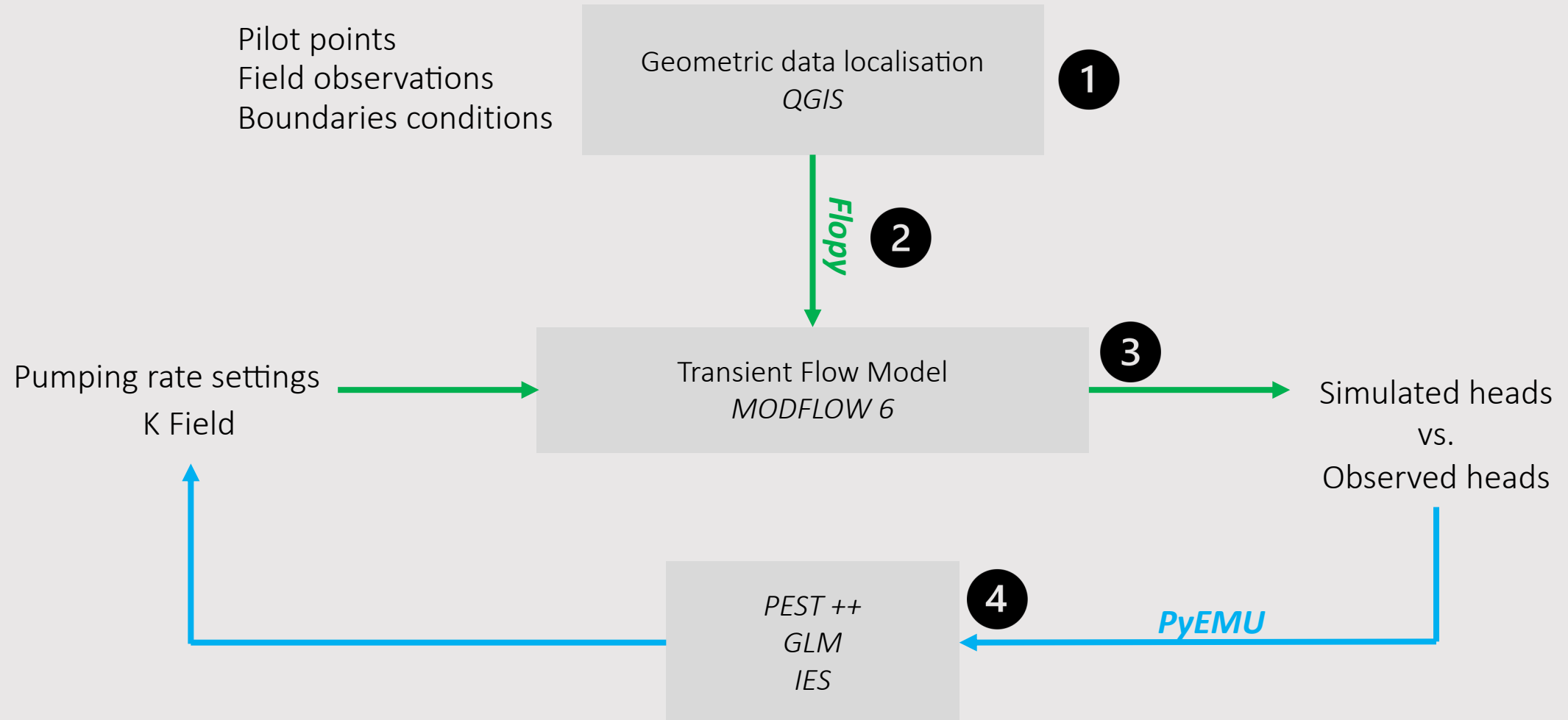


Fonctionnement du modèle inverse développé

(Boura and Cousquer, 2023)



Estimation de la conductivité hydraulique

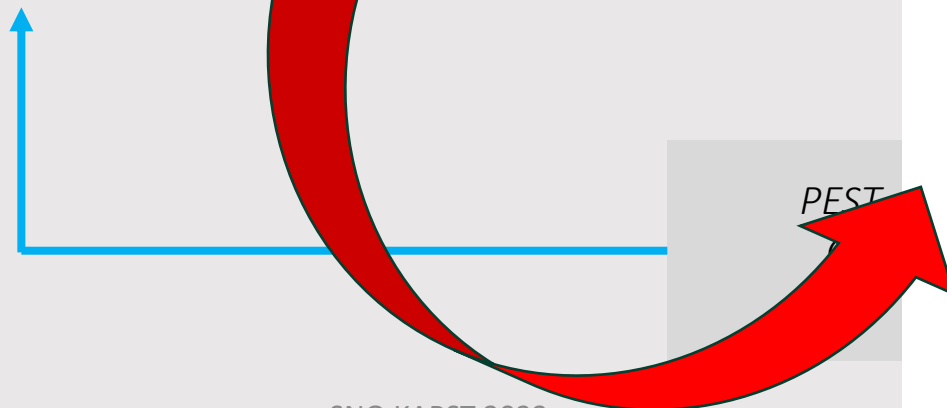


Estimation de la conductivité hydraulique

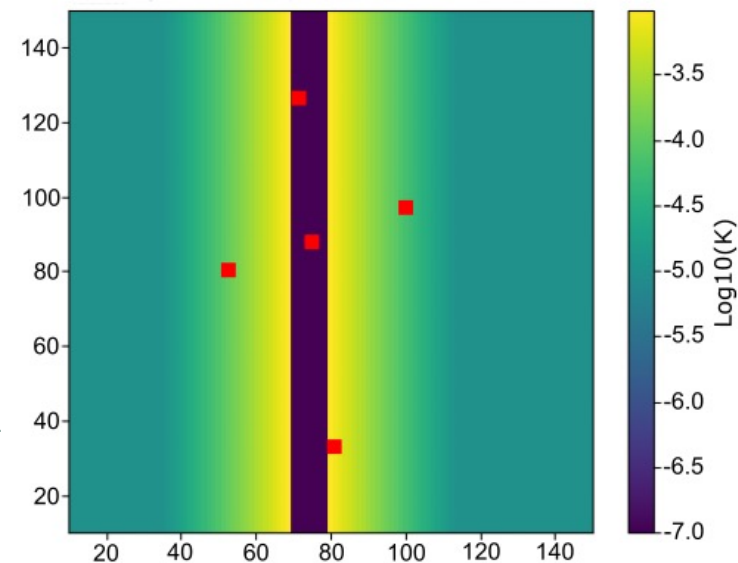
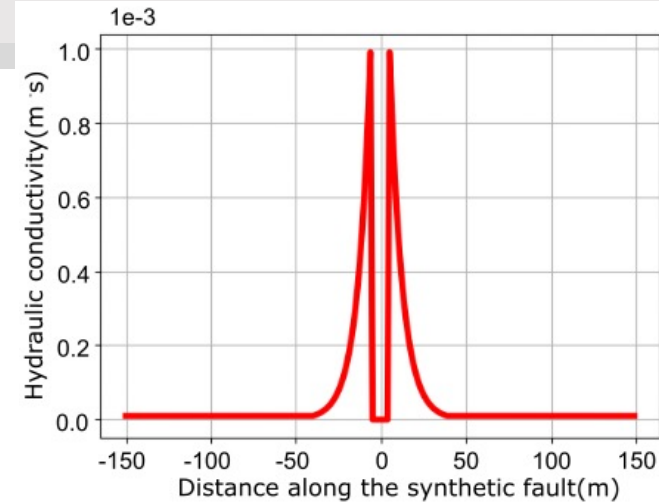
Cas synthétique de zone de faille

Construit pour tester la méthode

K Field



SNO KARST 2023



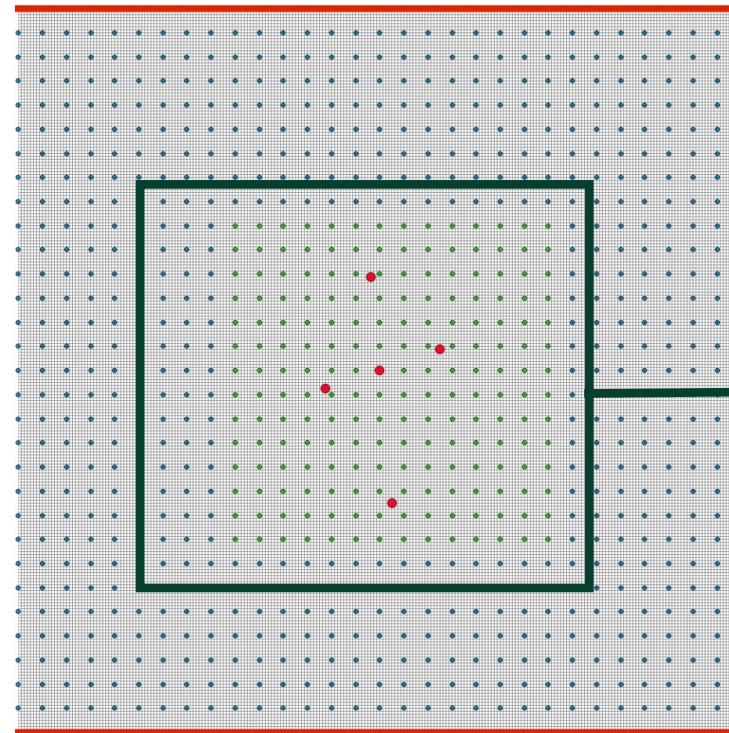
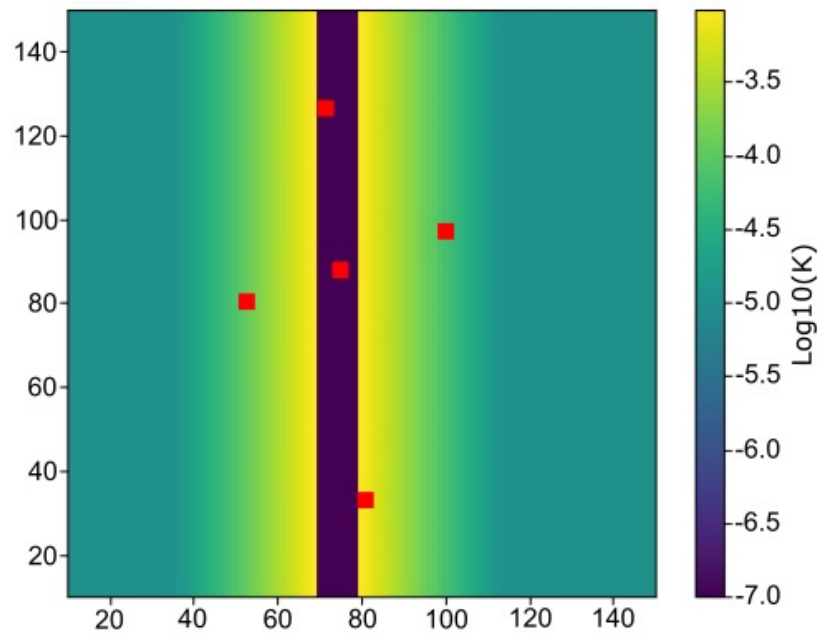
ed heads
S.
ed heads

Estimation de la conductivité hydraulique

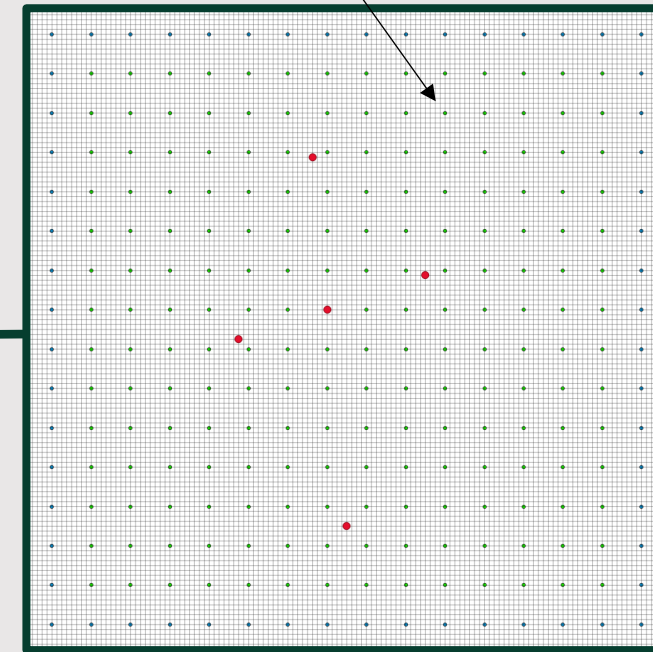
Pilot points
Field observations
Boundaries conditions

Geometric data localisation
QGIS

1



Points pilotes : liés / non liés



Estimation de la conductivité hydraulique

Pilot points
Field observations
Boundaries conditions

Geometric data localisation
QGIS

1*Flopy***2**

Gestion des fichiers pour MODFLOW

Pumping rate settings
K Field

Transient Flow Model
MODFLOW 6

3

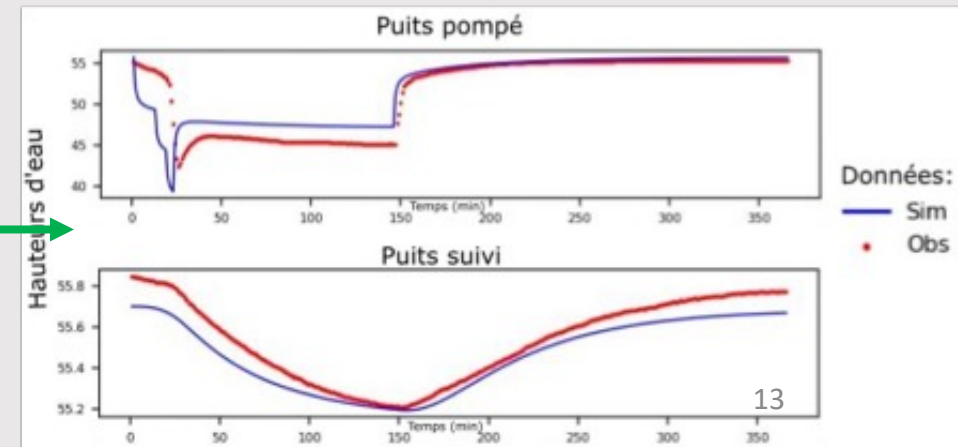
Simulated heads
vs.
Observed heads

Contexte des essais de nappes
observés : Débits, niveaux initiaux.

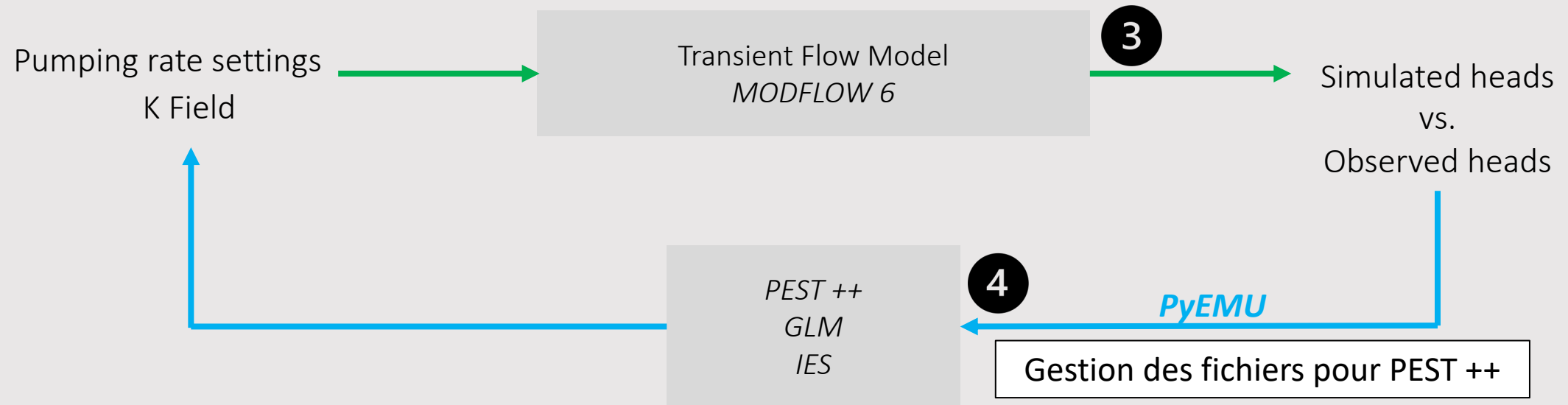
K moyens (connaissances Géol/ Hydro)

Simulation des essais par
pompage
(régime transitoire)

SNO KARST 2023



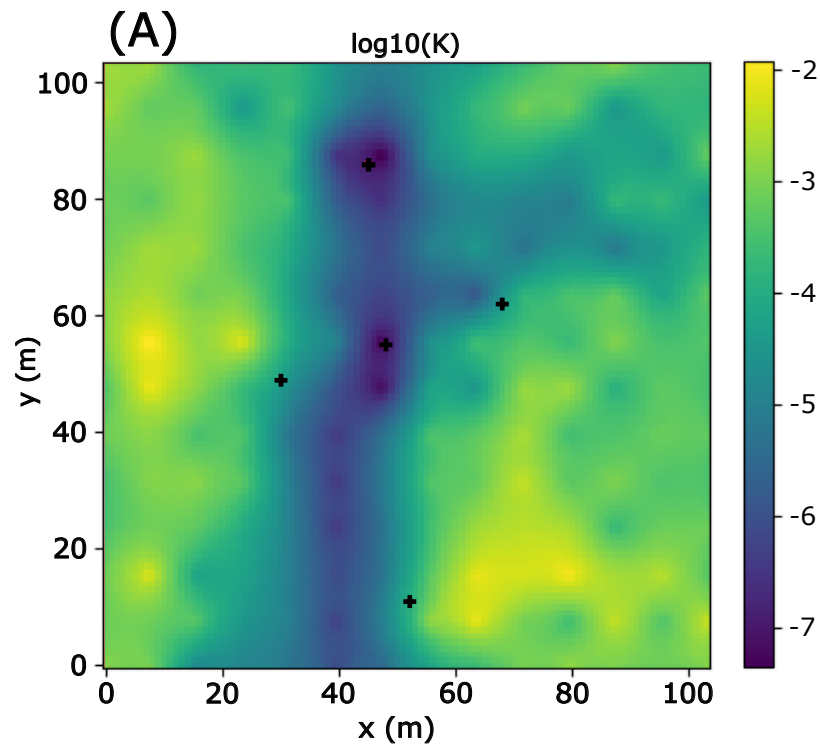
Estimation de la conductivité hydraulique



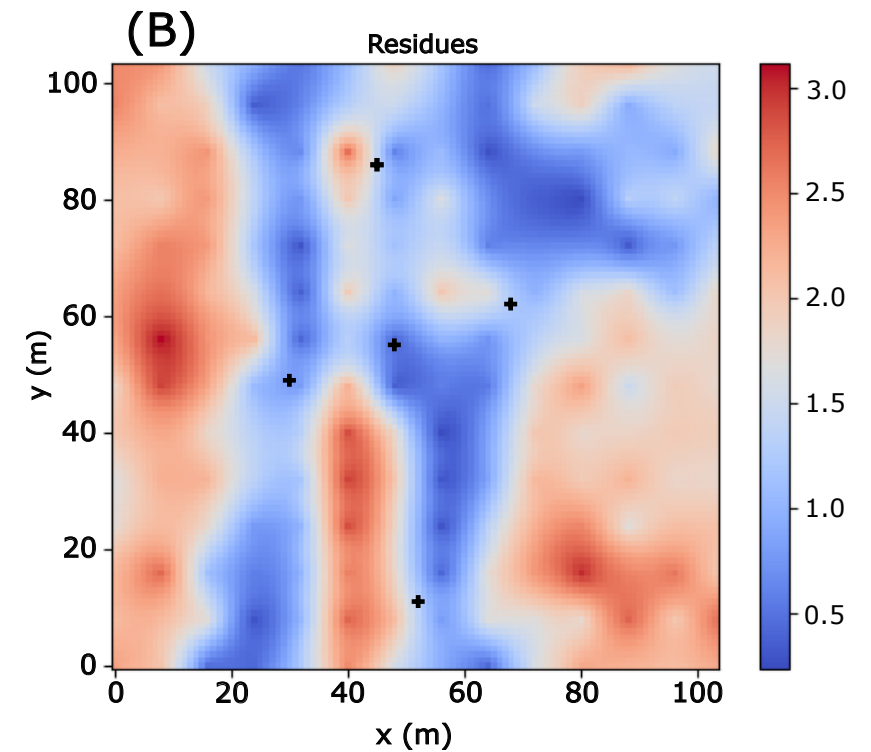
PEST ++
GLM : de K field vers 1 seul modèle de résultat K estimé
IES : Ensemble de K dans les bornes de K field vers un ensemble de modèle de K estimé

Estimation de la conductivité hydraulique

K Field
optimal



The hydraulic conductivity field estimated from GLM of the synthetic fault zone



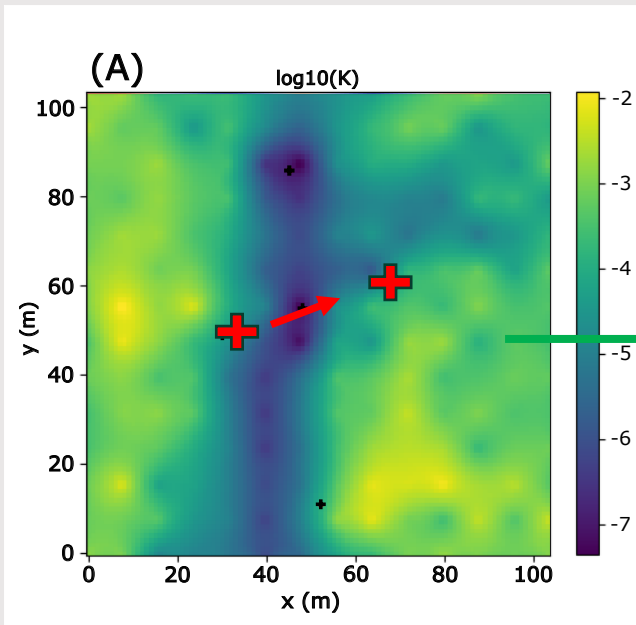
Uncertainty field of the GLM-estimated hydraulic conductivity

PEST ++
GLM

4

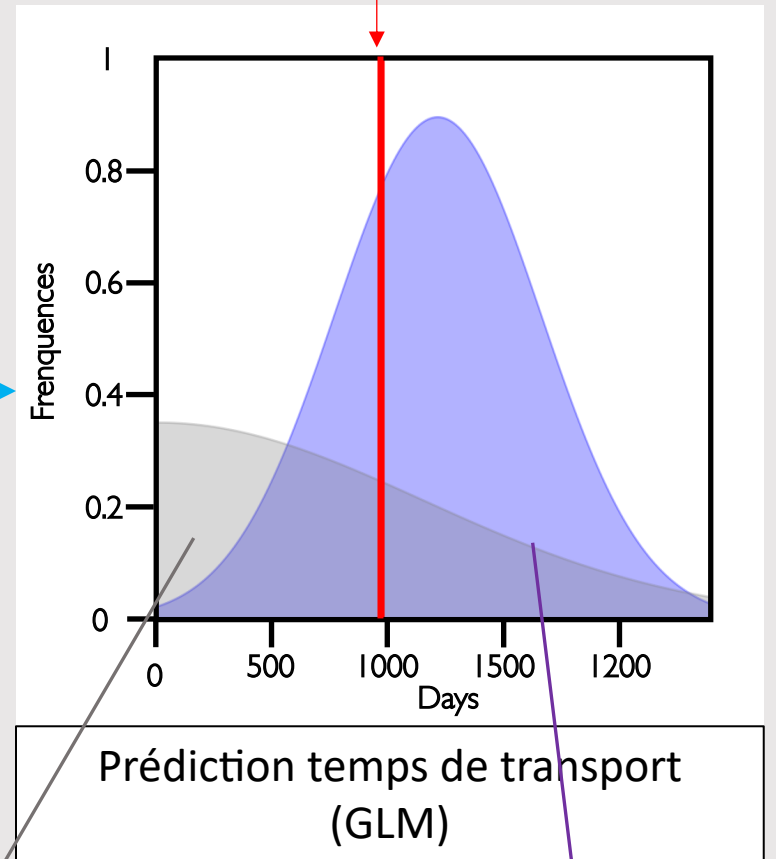
PyEMU

Prédiction



Simulation des essais par pompage
+
Particule tracking entre forage de
part et d'autre de la faille
(régime permanent)

Temps réel (cas synthétique)



Prior

Posterior

Steady State
MODFLOW 6
MODPATH 7

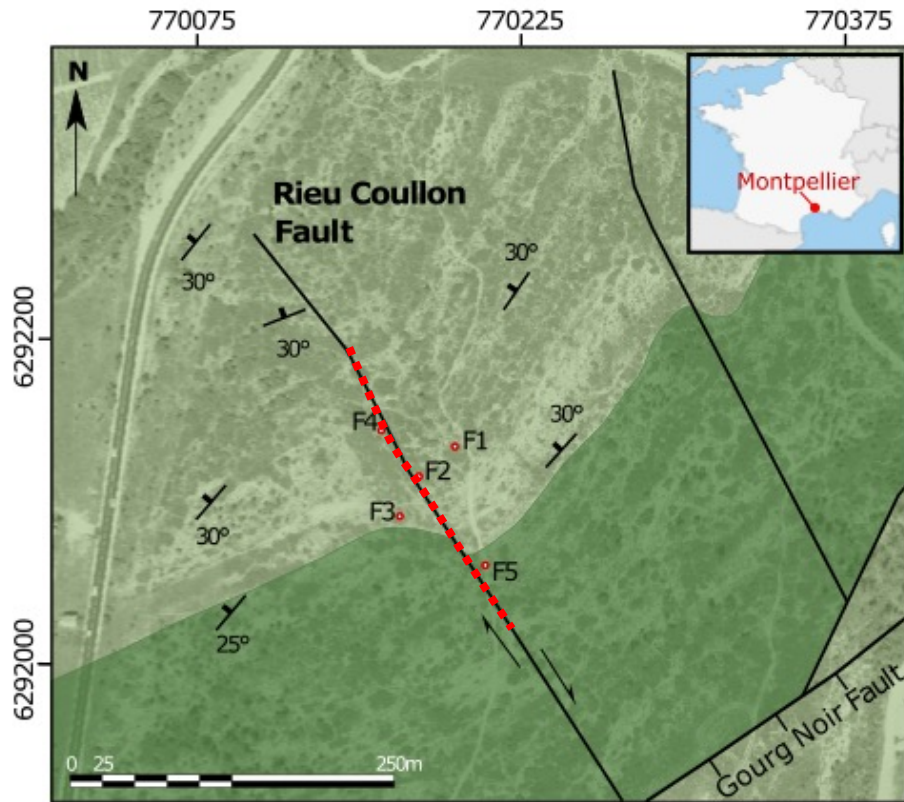
Heads
Concentrations

PEST ++
FOSM
IES

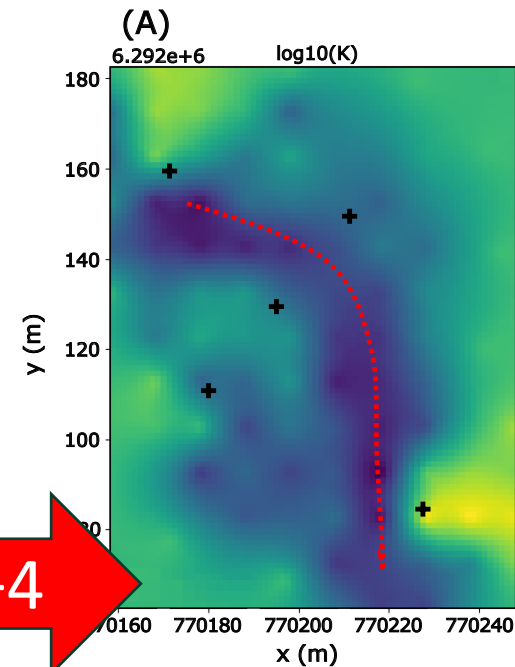
Predictive
Uncertainty

Cas d'étude

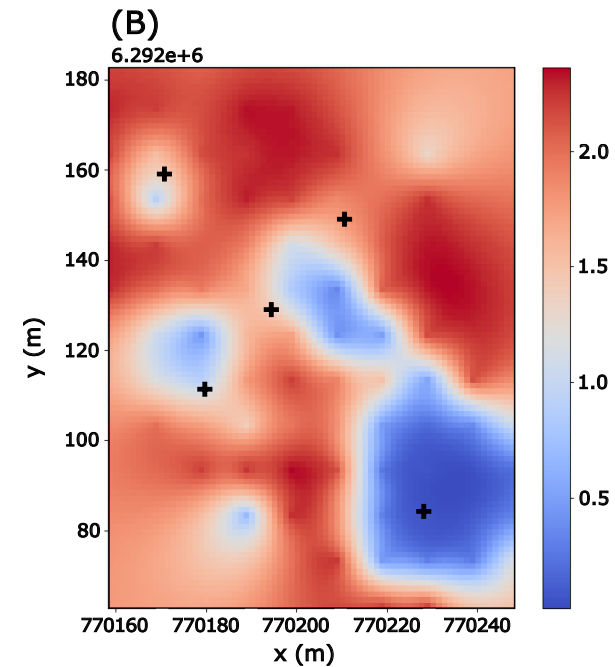
Résultats



1+2+3+4



Results of the hydraulic conductivity estimates of the Rieu Coullon Fault by GLM.

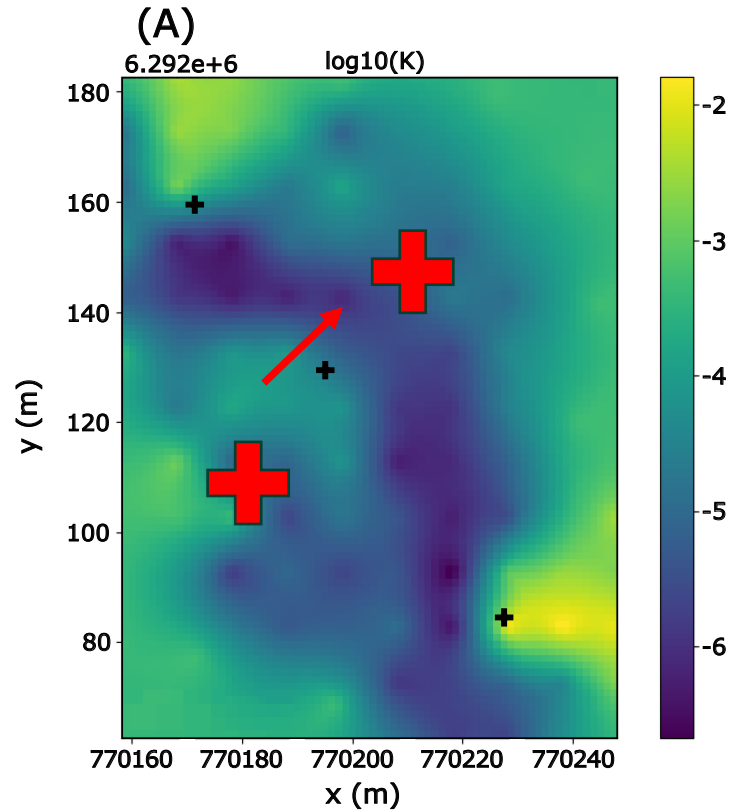


Uncertainty of hydraulic conductivity estimation

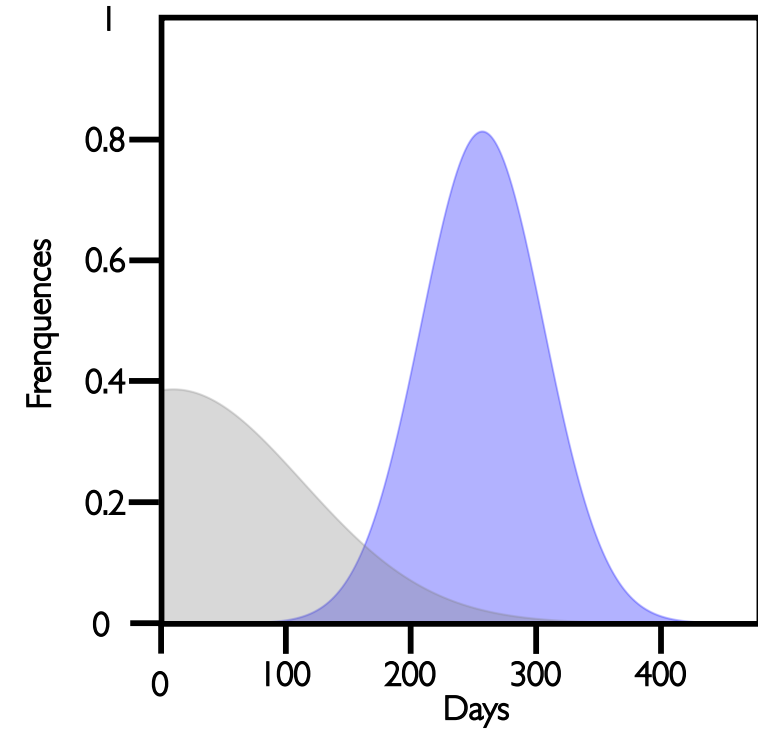
- L'estimation fait ressortir une zone de faible perméabilité
- Incertitudes paramétriques satisfaisantes

Cas d'étude

Résultats



Results of the hydraulic conductivity estimates of the Rieu Coullon Fault by GLM.



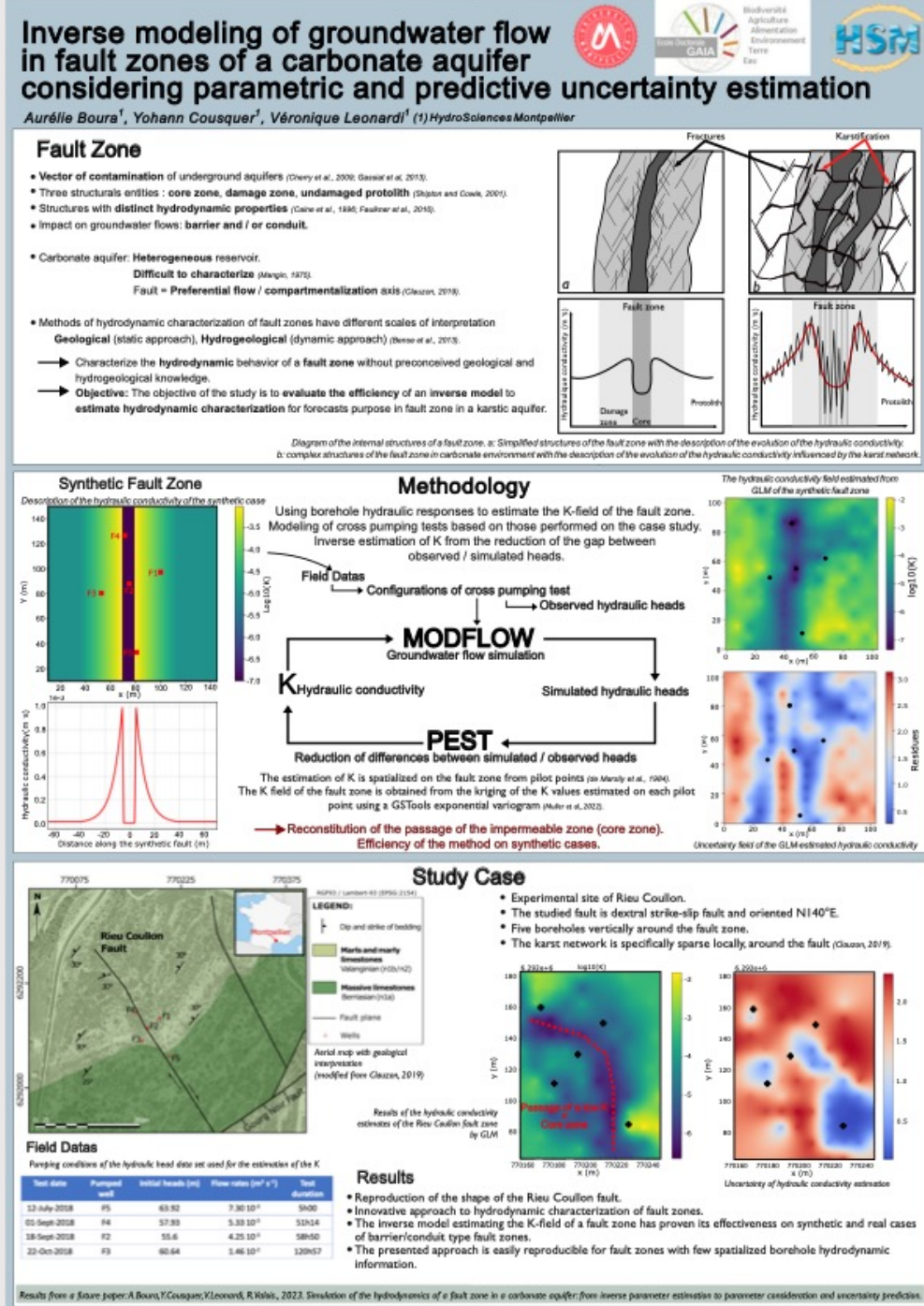
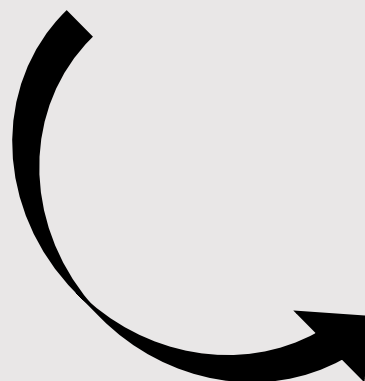
Predicting the transport time of a particle between two wells on either side of the Rieu Coullon fault.

Temps de transport estimé:
forte probabilité entre 200 et 300 jours

- **Méthodologie efficiente**
 - **Tester sur cas synthétique / cas d'étude**
 - **Un estimation paramétrique associée à son incertitude**
 - **Prédiction associée à son incertitude**
 - **Une méthode qui demande peu d'information spatialisée**
 - **Facilement reproductible**
 - **Nécessite des puits d'observations de part et d'autre de la zone de faille**
-
- **En perspective** : Implémenter l'information issu de traçage artificiel/naturel (tester l'estimation / prédiction)

Merci pour votre attention

Plus de détails sont disponibles dans mon poster



Annexes

- Conceptualisation du cas synthétique

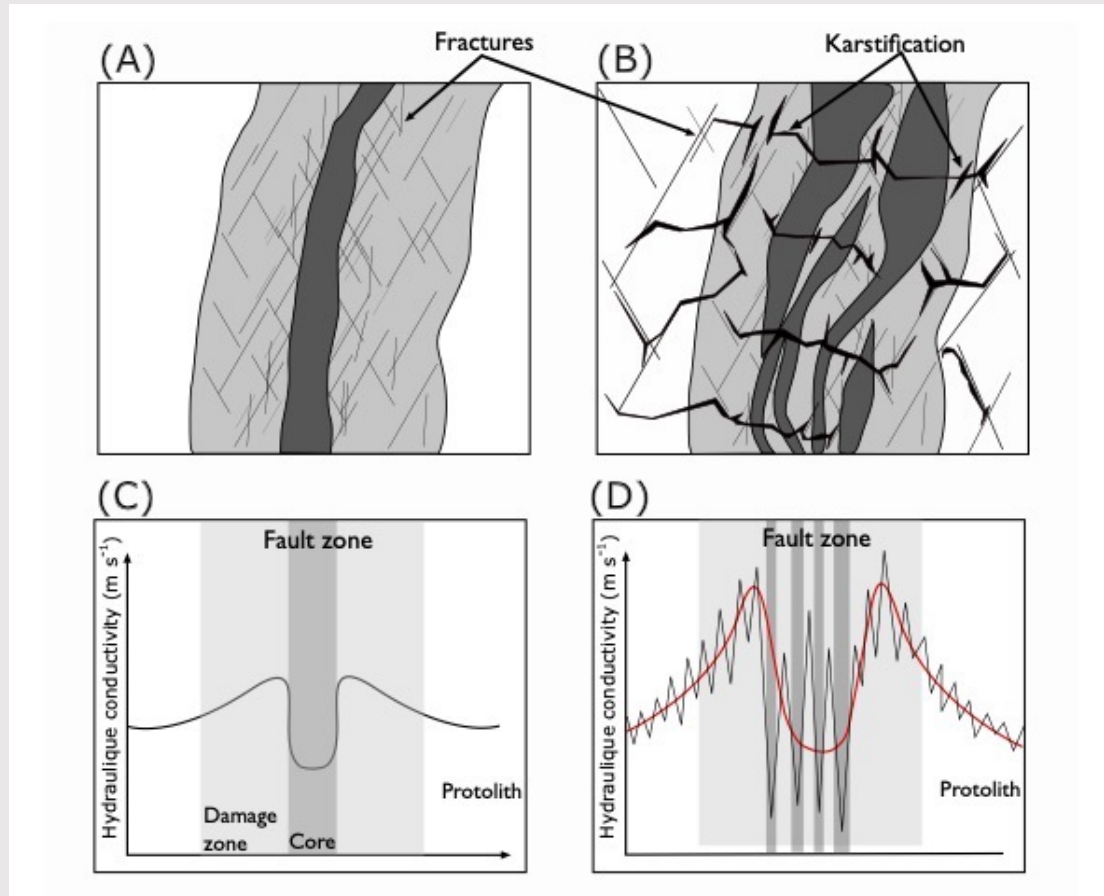
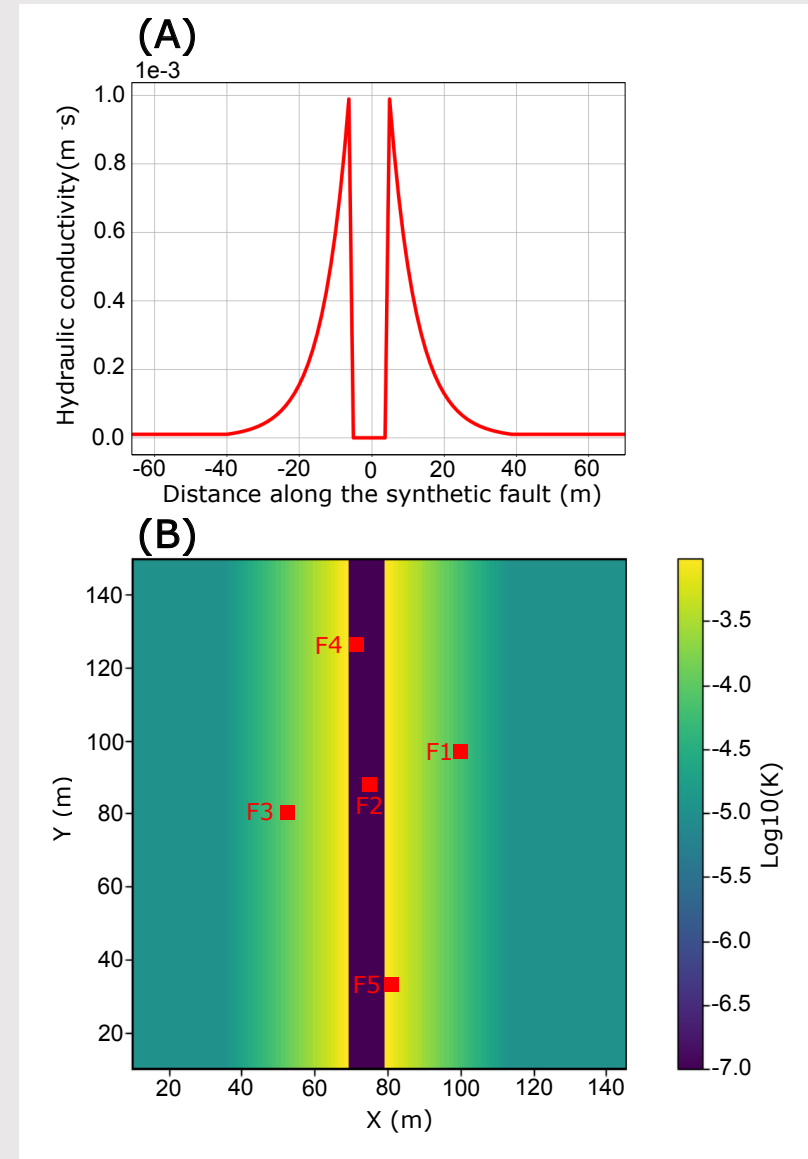


Fig 2: Fault zone Internal structures and associated hydraulic conductivity variation for a karstified and non-karstified media of the fault zone schematically.



Generated hydraulic conductivity of the synthetic case. A: Variation of the hydraulic conductivity perpendicular to the central segment of the synthetic fault. B: Hydraulic conductivity field of the synthetic fault zone. In red are implemented wells.

Annexes

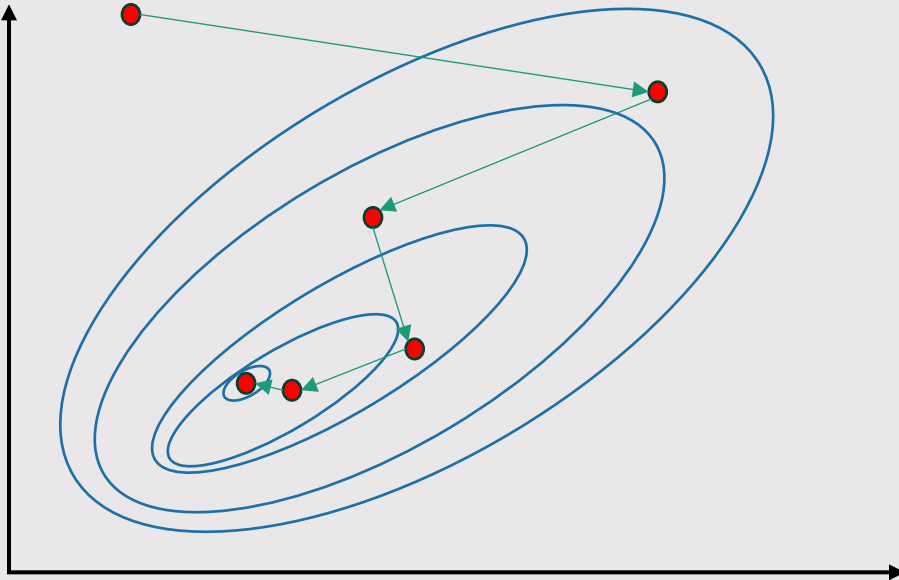
Fonction objectif

$$\Phi = \sum_{i=1}^m (w_i r_i)^2$$

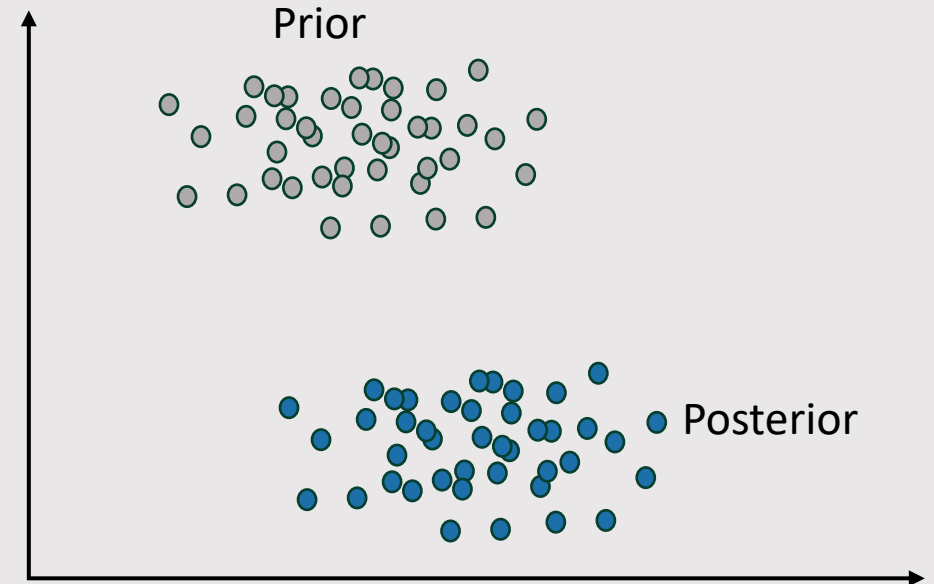
La Descente de Gradient : un algorithme d'optimisation

Régression linéaire simple basé sur la minimisation des écarts entre valeurs observées et simulées au carré

- PEST ++ GLM



- PEST ++ IES



Biblio

- Caine, J. S., Forster, C. B., and Evans, J. P., 1993, A classification scheme for permeability structures in fault zones: *Eos* (Transactions, American Geophysical Union), v. 74, p. 677. (3) (PDF) Fault zone architecture and permeability structure. Available from: https://www.researchgate.net/publication/215755208_Fault_zone_architecture_and_permeability_structure.
- V. Clauzon, Université de Montpellier, Biodiversité A., et HydroSciences Montpellier. 2019. Léonardi V., Pistre S., Leduc C., Dörfliger N., Andreo-Navarro B., Homberg C., *Caractérisation in situ multi-échelles des transferts de fluide en zone de faille en milieu carbonaté*. 2019 <http://www.theses.fr/2019MONTG075/document>.
- Cousquer, Yohann. « Modélisation des échanges nappe-rivière à l'échelle intermédiaire : conceptualisation, calibration, simulation ». Theses, Université Bordeaux Montaigne, 2017. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01567824>.
- ponible sur : Mangin A. (1975) Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse de Doctorat en Sciences naturelles, Université de Dijon.
- Zoback M.D. et Kohli A.H. 2019. *Unconventional Reservoir Geomechanics: Shale Gas, Tight Oil, and Induced Seismicity*. 1re éd. Cambridge University Press <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781316091869/type/book>.