

Contraindre la recharge, les modalités et structures d'écoulement en contexte carbonaté

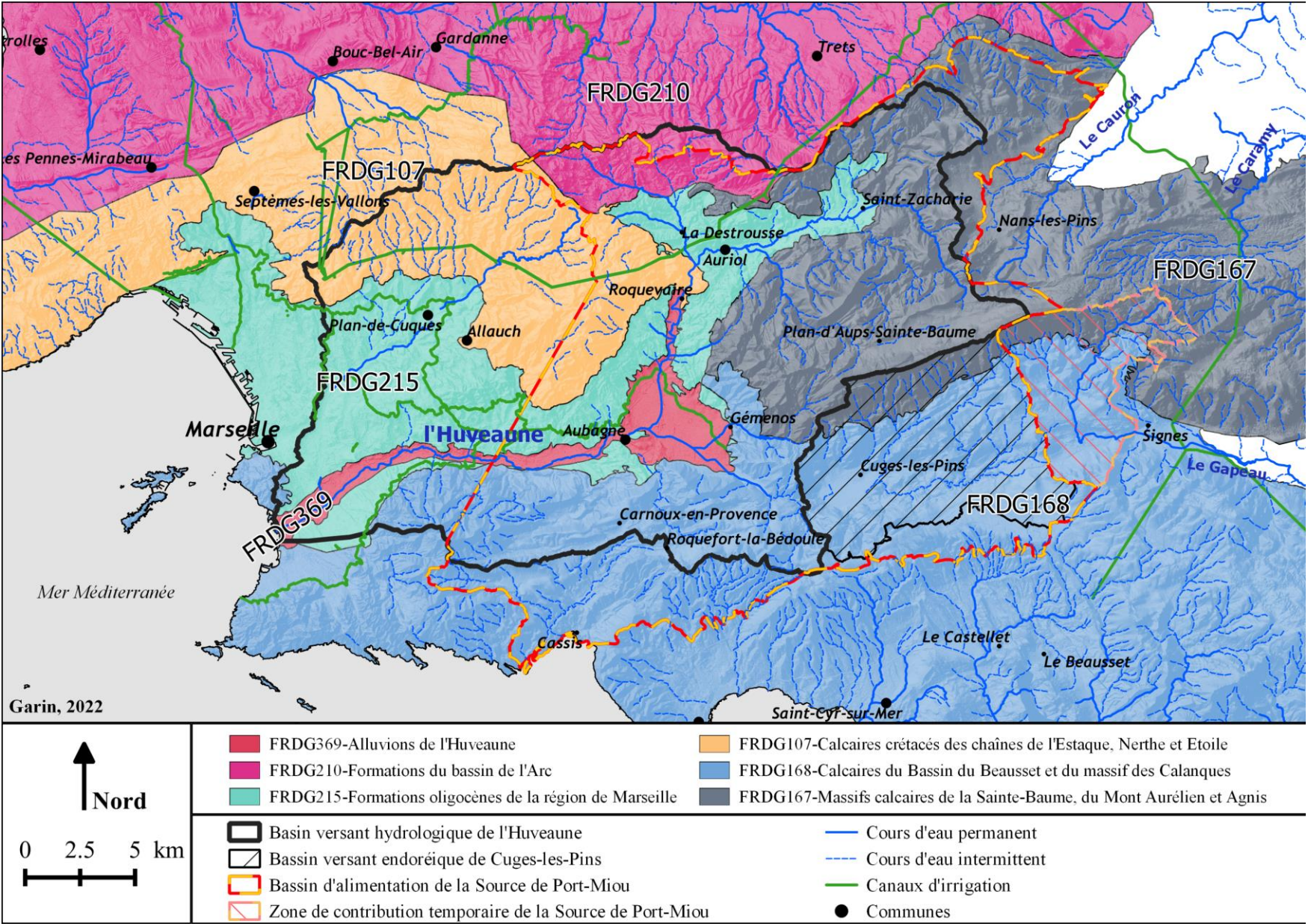
Application aux ressources en eau des bassins versants de l'Huveaune
et du karst de Port-Miou (Sud-Est de la France)

Thibaut Garin

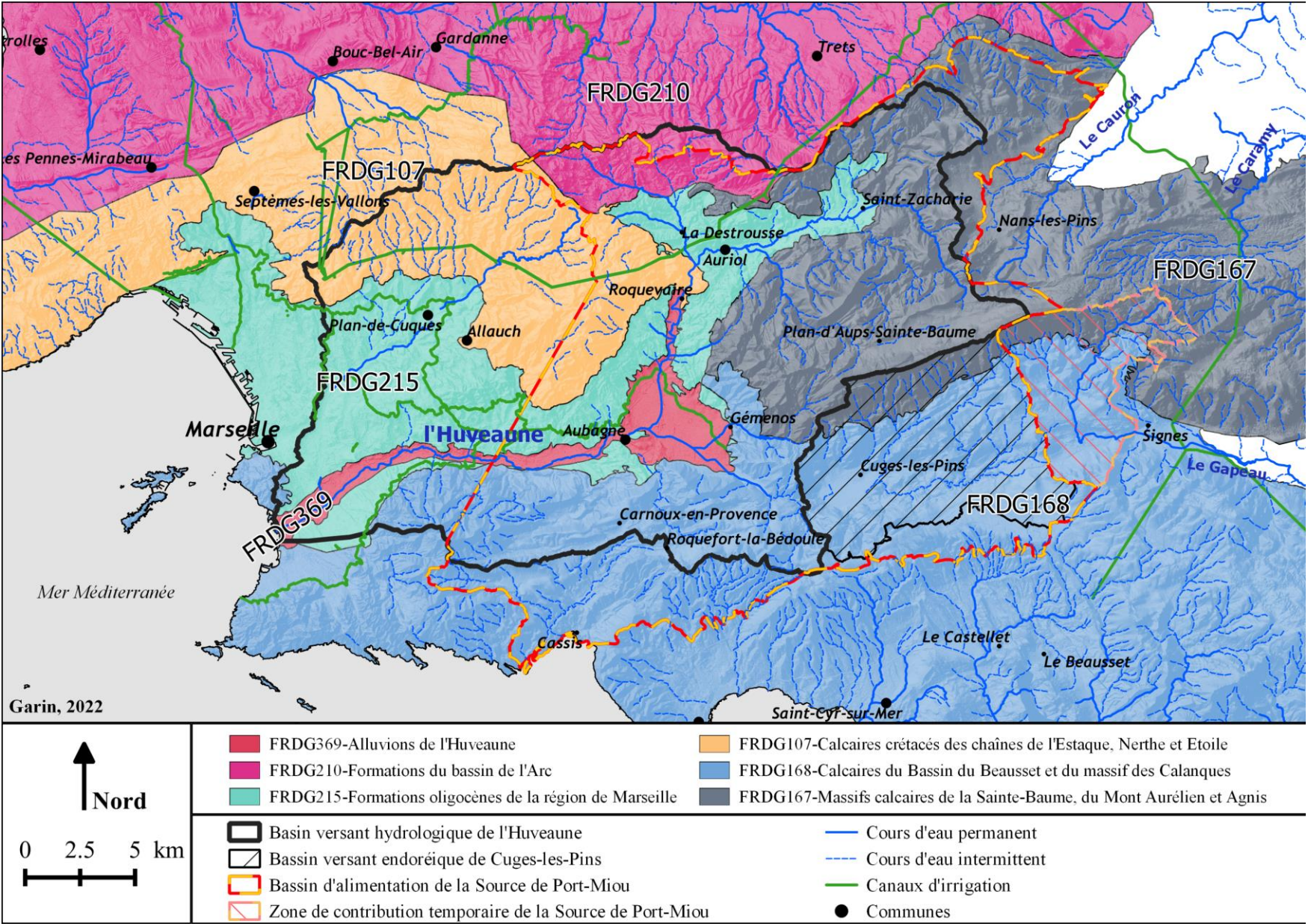
15 décembre 2022

Bruno Arfib, Julio Goncalves
Bernard Ladouche, Benoît Dewandel





- AEP par les canaux
- AEP sollicite localement les eaux souterraines
- Aucune ressource de surface

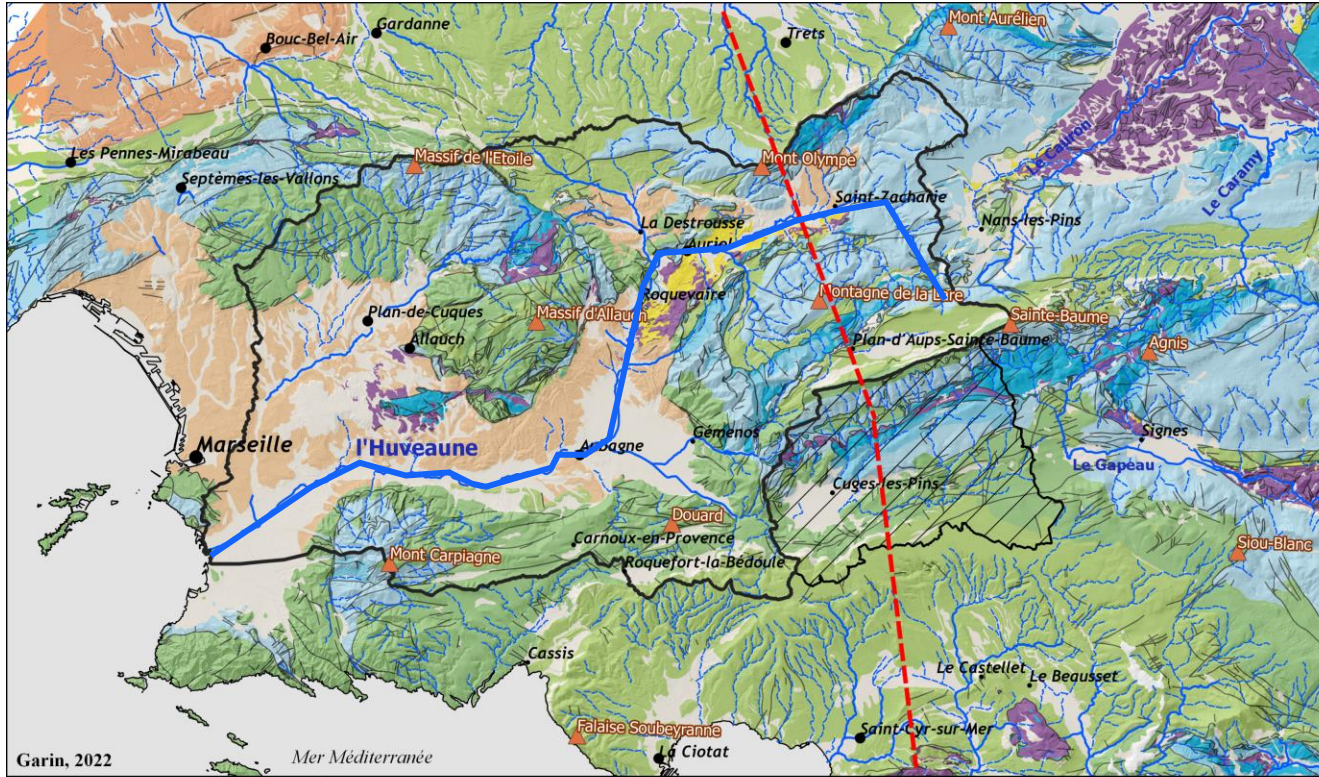


- AEP par les canaux
- AEP sollicite localement les eaux souterraines
- Aucune ressource de surface

Contexte changement climatique:

- Diversification de la ressource
- L'eau souterraine comme seul ressource à long terme
- Classification en ressource stratégique des masses d'eau Sainte-Baume et Beausset par le SDAGE

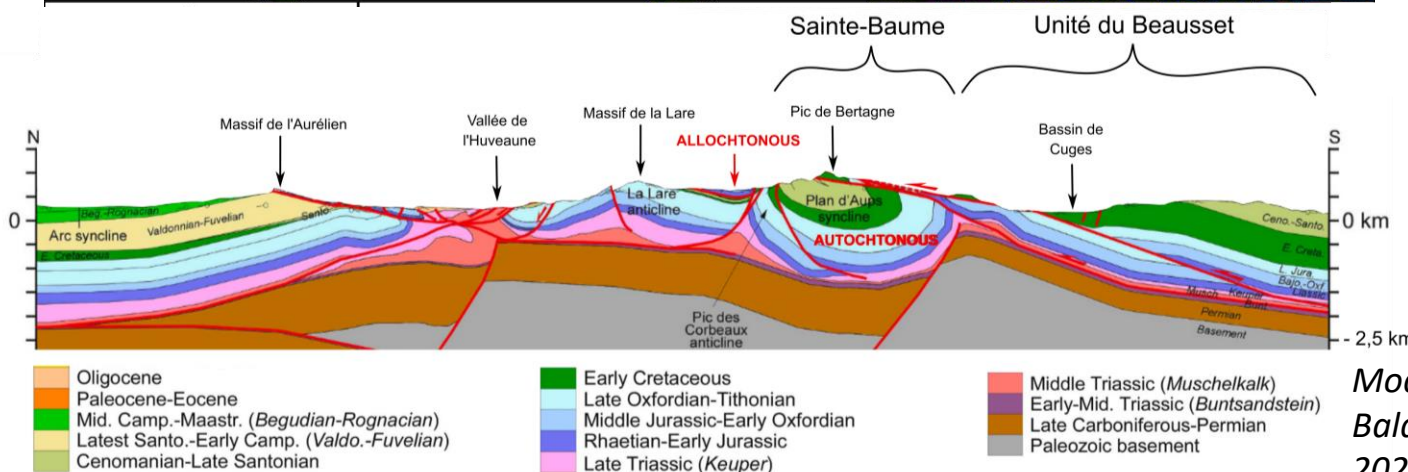
➔ **Besoin de mieux connaître la ressource en eau**



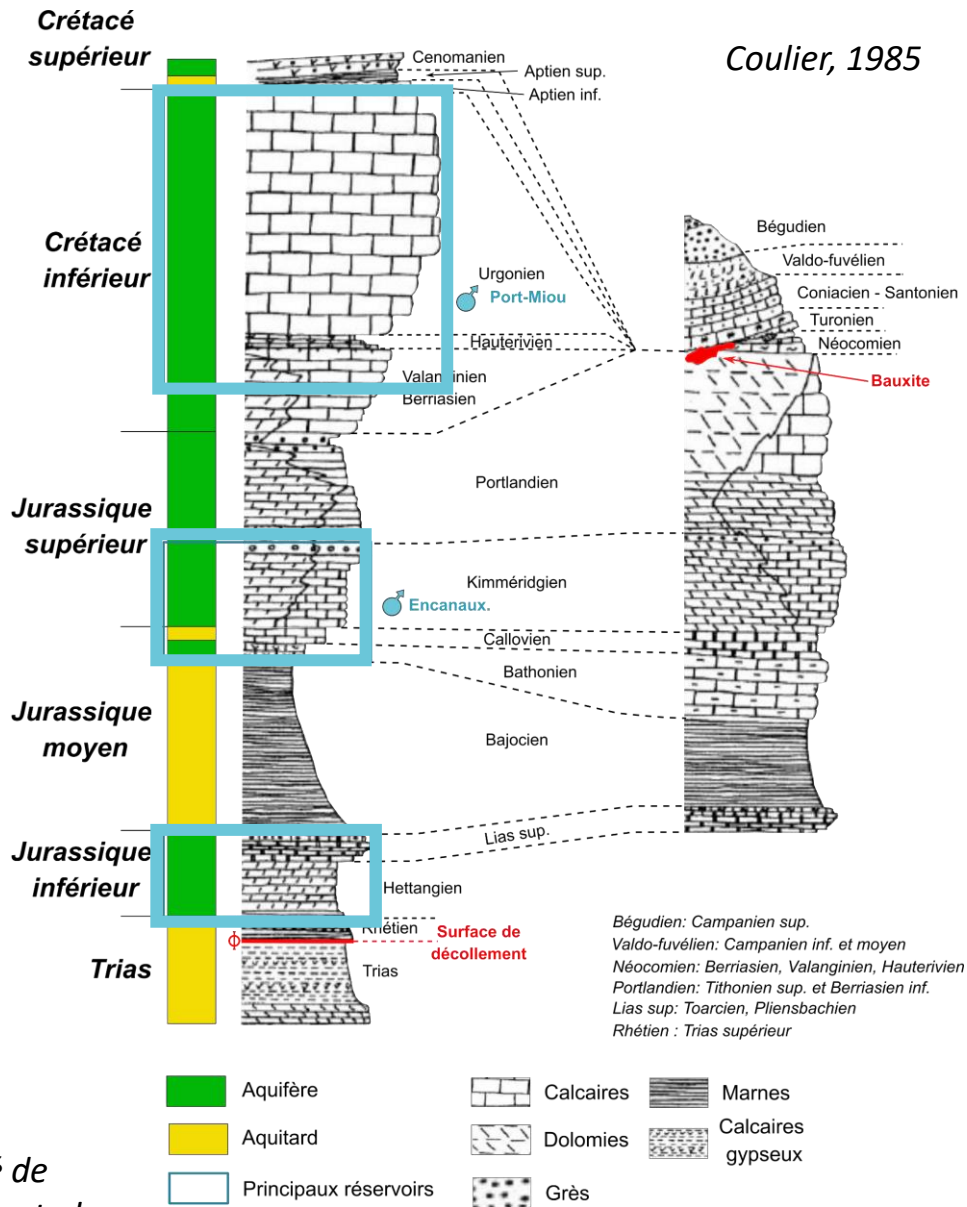
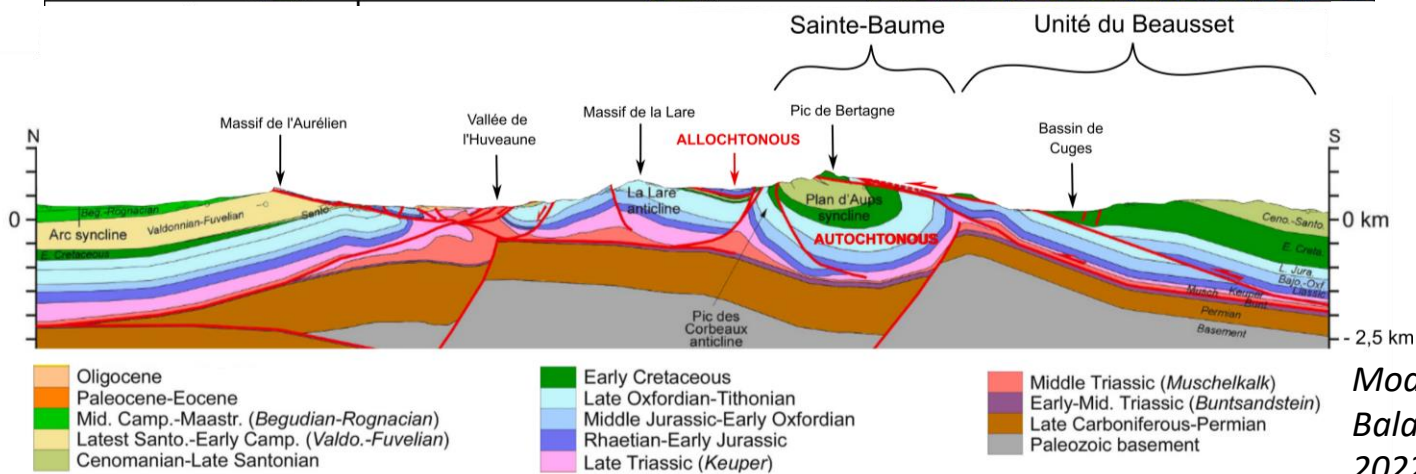
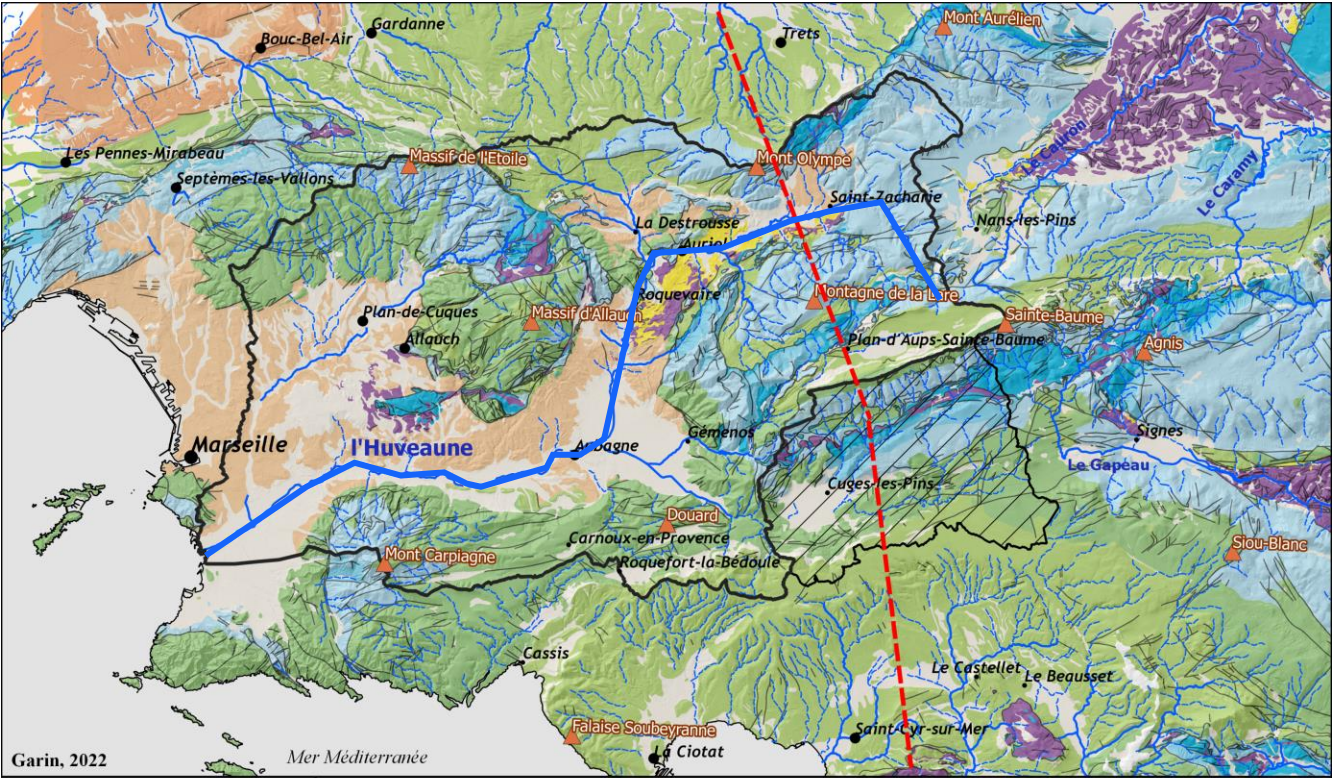
- Grandes structures de chevauchement d'orientation est-ouest
- Présence de formations triasiques calcaires et gypseuses → Surface de décollement
- Formations calcaires et dolomitiques du Crétacé et Jurassique
- Compartimentation régionale

→ Quel rôle dans les écoulements souterrains localement et régionalement ?

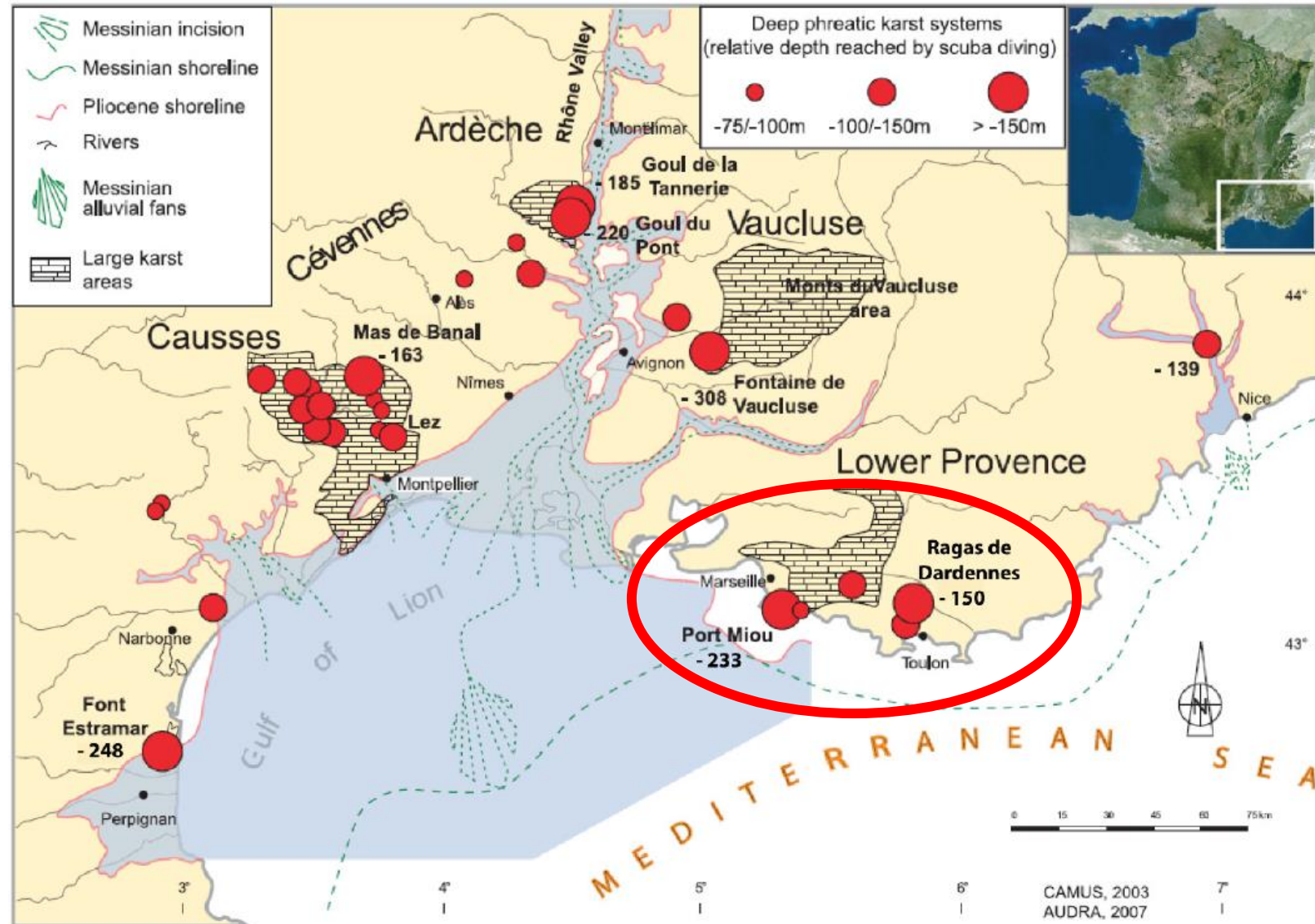
→ Quelle est la signature géochimique des masses d'eau ? Existe-t-il des mélanges entre masses d'eau ?



Modifié de
Balansa et al.,
2022

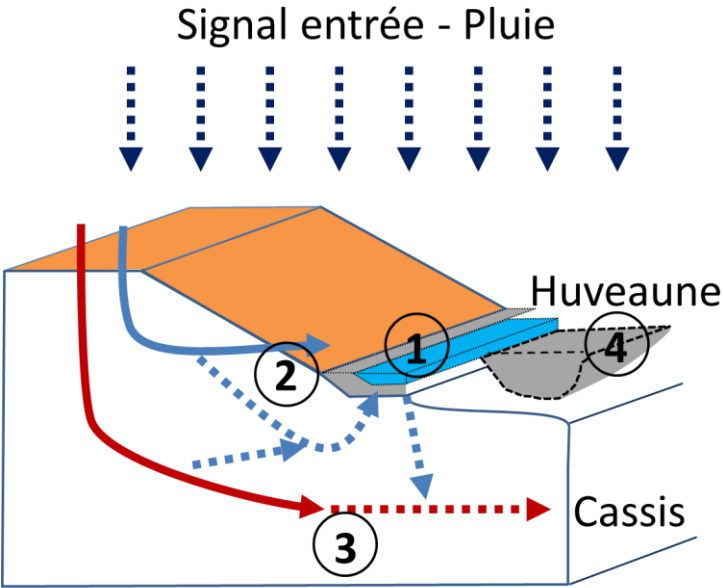
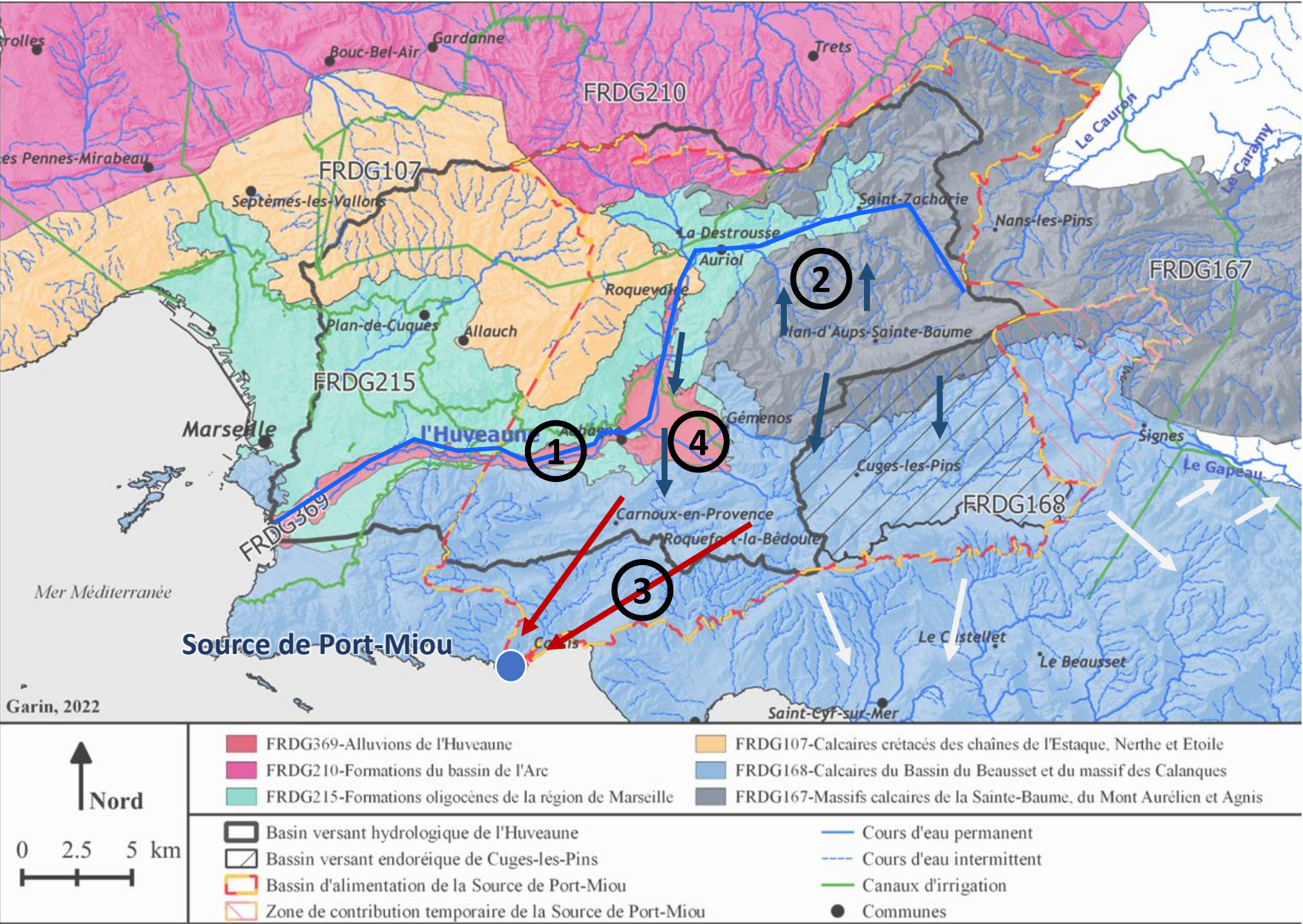


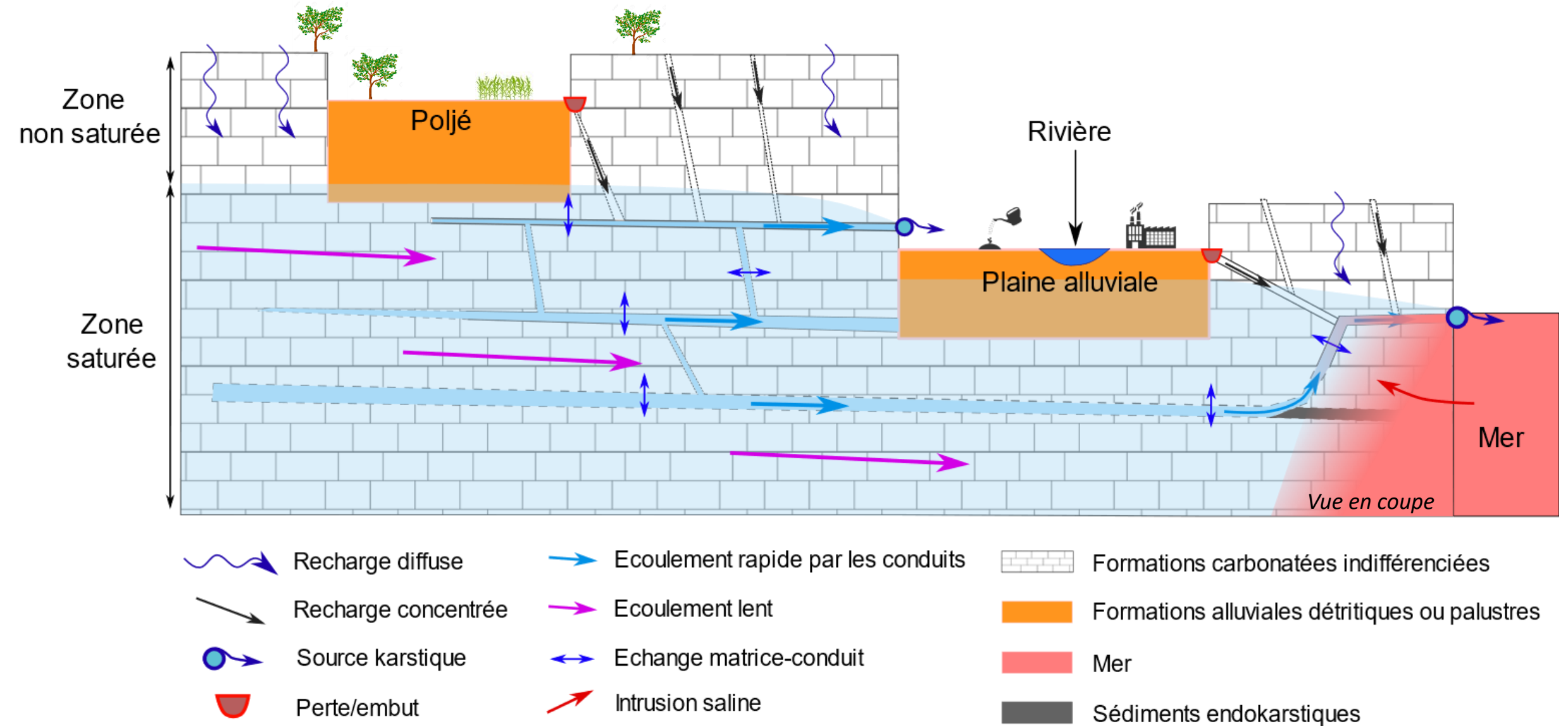
Modifié de
Balansa et al.,
2022



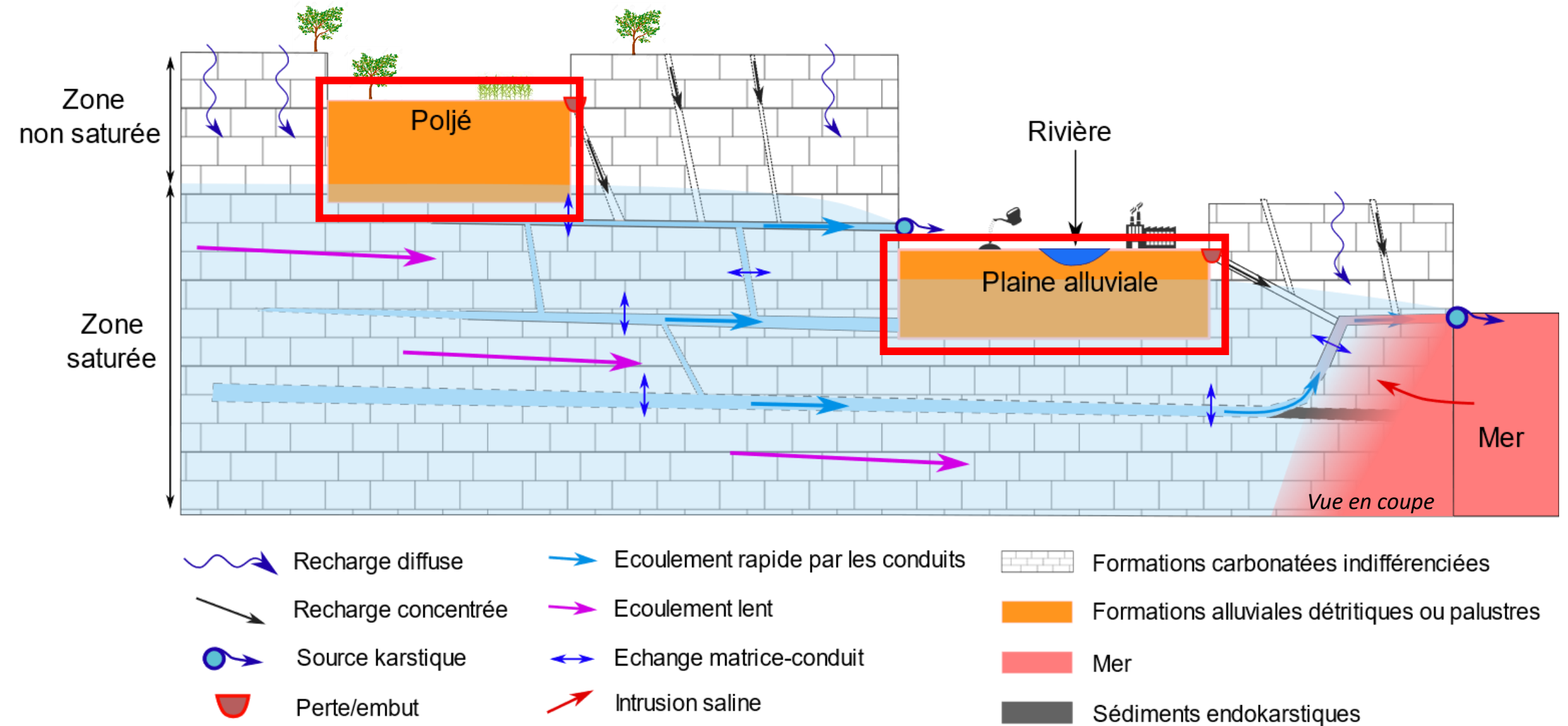
Plusieurs phases de karstification

- Karstification lors de la mise en place des structures pyrénéo-provençales
- Oscillation eustatique au Messinien (-5.7 à -5.2 Ma)
- Oscillation eustatique au quaternaire

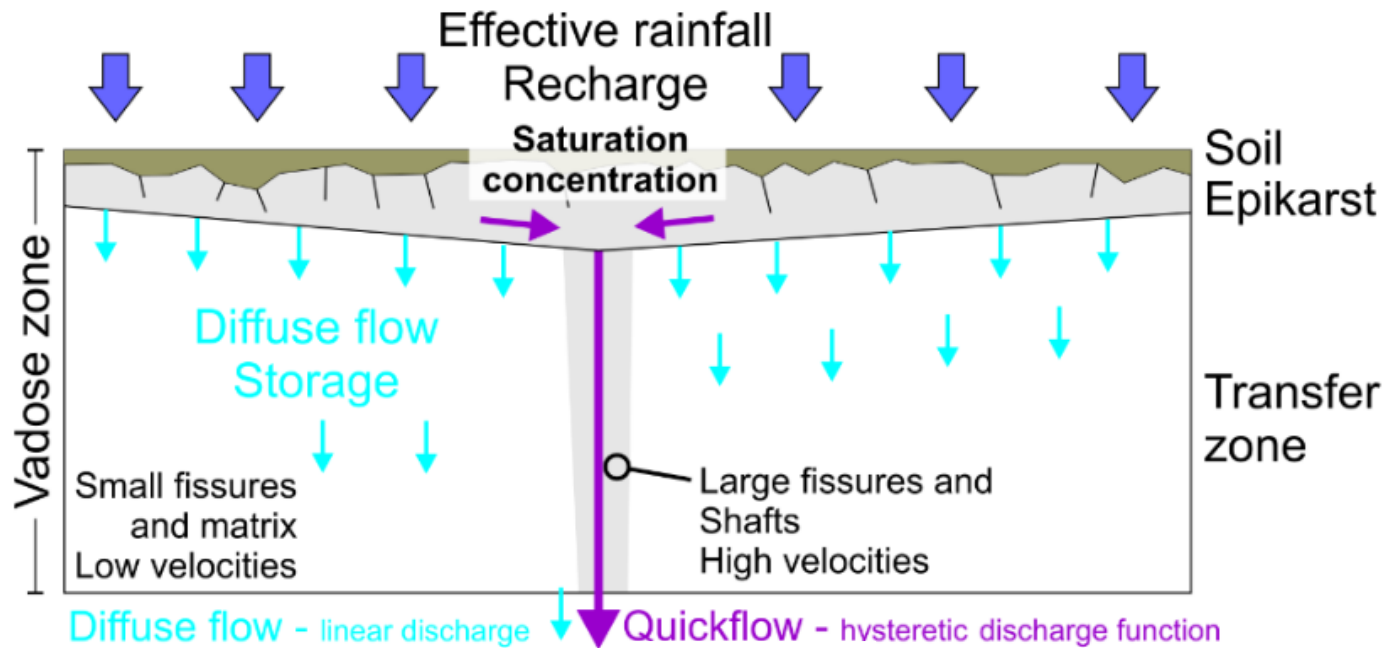




→ Quelle est la géométrie des aquifères ?



➔ Que représentent les alluvions pour la ressource en eau ?



Poulain et al, 2018



Lapiaz sur le massif de la Sainte-Baume
D. Caviglia, PNR Sainte-Baume

- Épikarst – zone d’infiltration de l’eau
- Dualité de la recharge – diffuse ou concentrée
- Relation entre épikarst et eau souterraine

➔ **Quelle est la signature géochimique du signal d’entrée dans les aquifères karstiques ?**

Contraindre la recharge, les modalités d'écoulement et la géométrie des aquifères

Problématiques

Comment caractériser l'hétérogénéité et la géométrie des aquifères ?

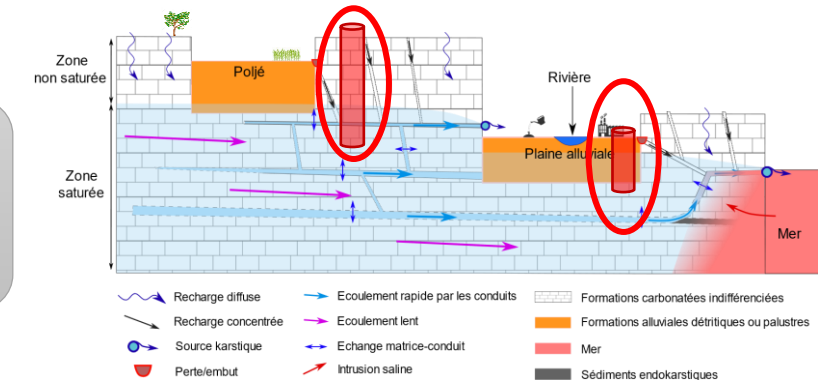
Quelle est la signature géochimique des masses d'eau ?

Quel est le signal isotopique de la recharge ?

Méthodologie

Diagnostic de puits et modélisation des écoulements

Essai de pompage



Contraindre la recharge, les modalités d'écoulement et la géométrie des aquifères

Problématiques

Comment caractériser l'hétérogénéité et la géométrie des aquifères ?

Quelle est la signature géochimique des masses d'eau ?

Quel est le signal isotopique de la recharge ?

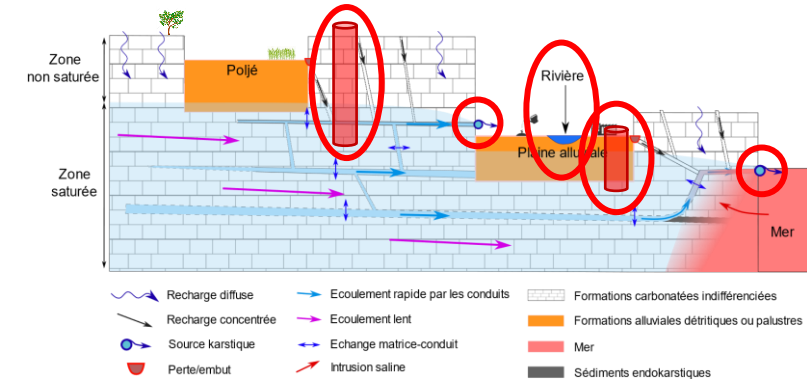
Méthodologie

Diagnostic de puits et modélisation des écoulements



Traçages naturels à l'aide des ions majeurs et des outils isotopiques ($d^{18}O$, d^2H ; $^{87}Sr/^{86}Sr$; $d^{34}S_{SO4}$)

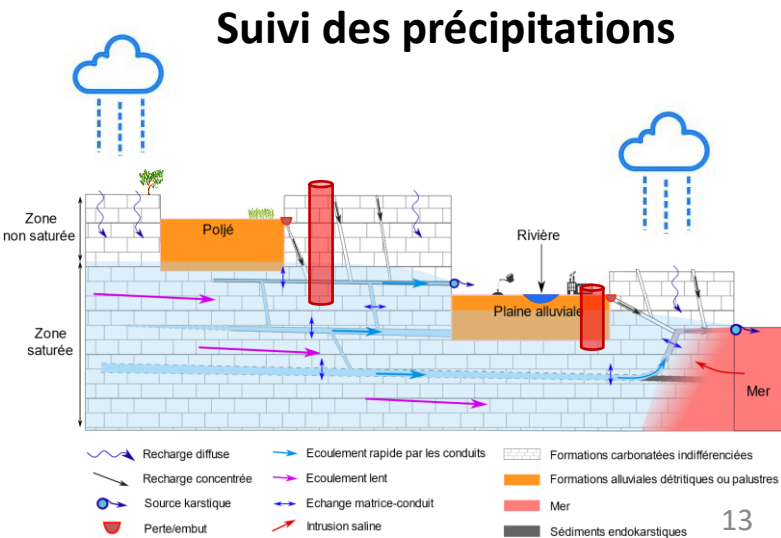
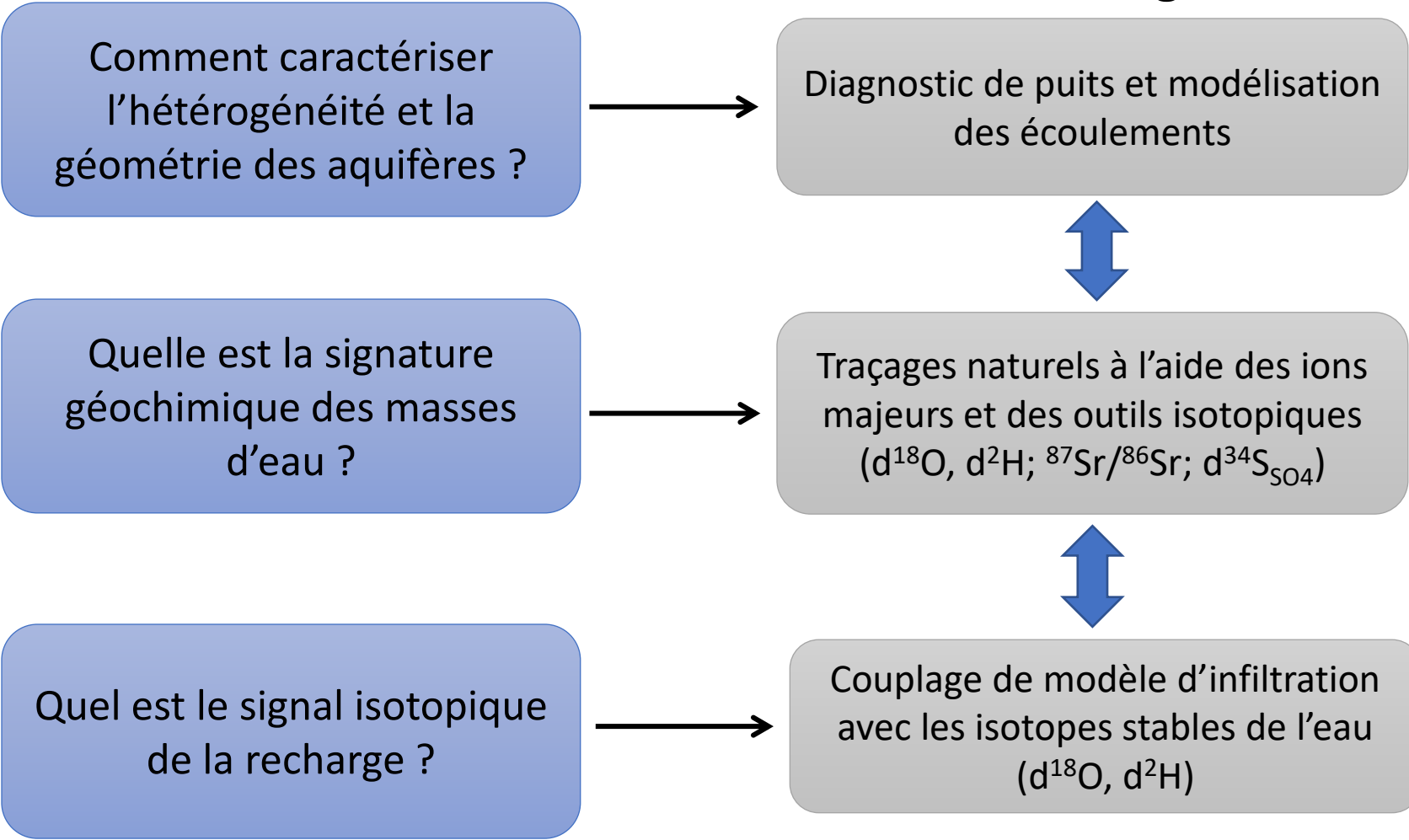
Suivi spatial et temporel

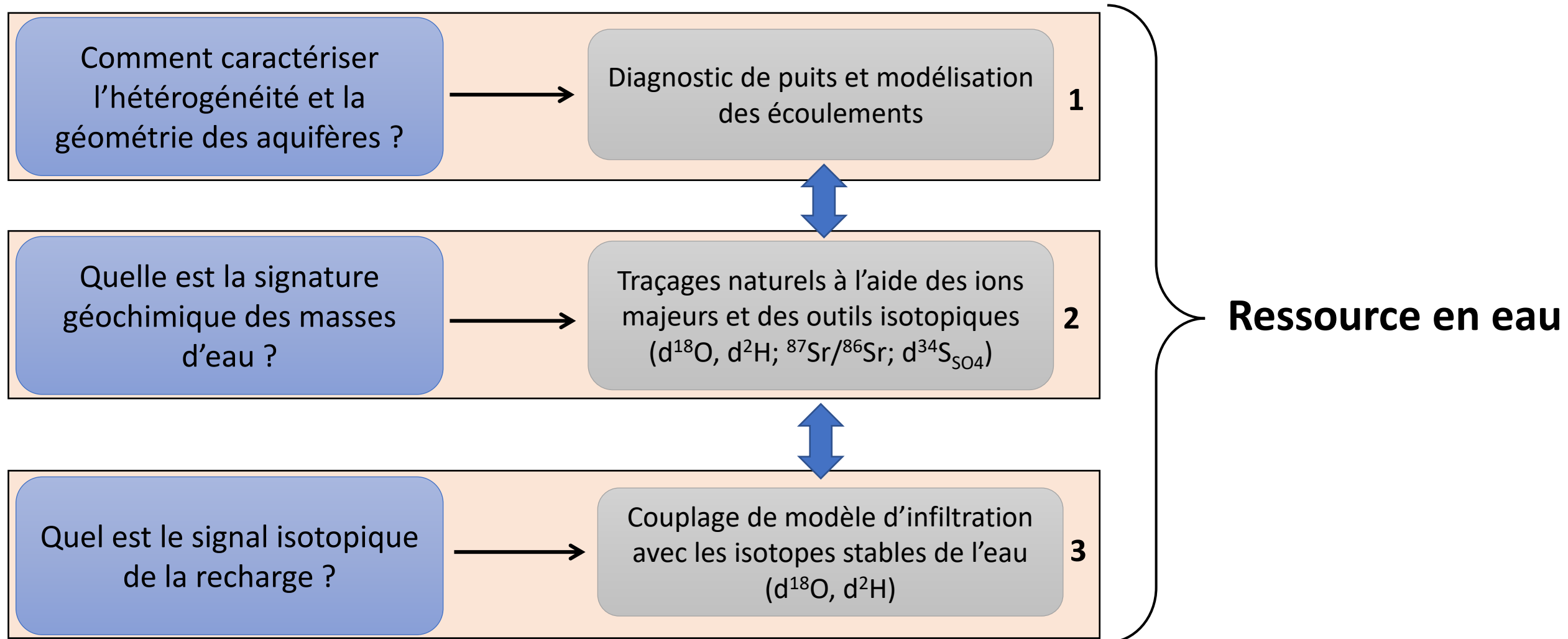


Contraindre la recharge, les modalités d'écoulement et la géométrie des aquifères

Problématiques

Méthodologie





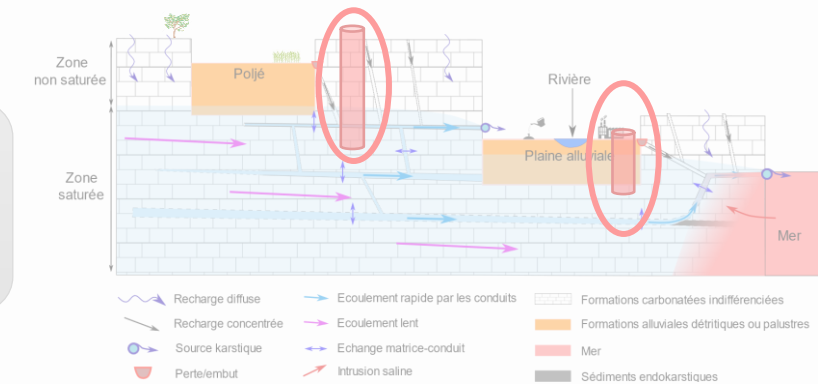
Problématiques

Comment caractériser l'hétérogénéité et la géométrie des aquifères ?

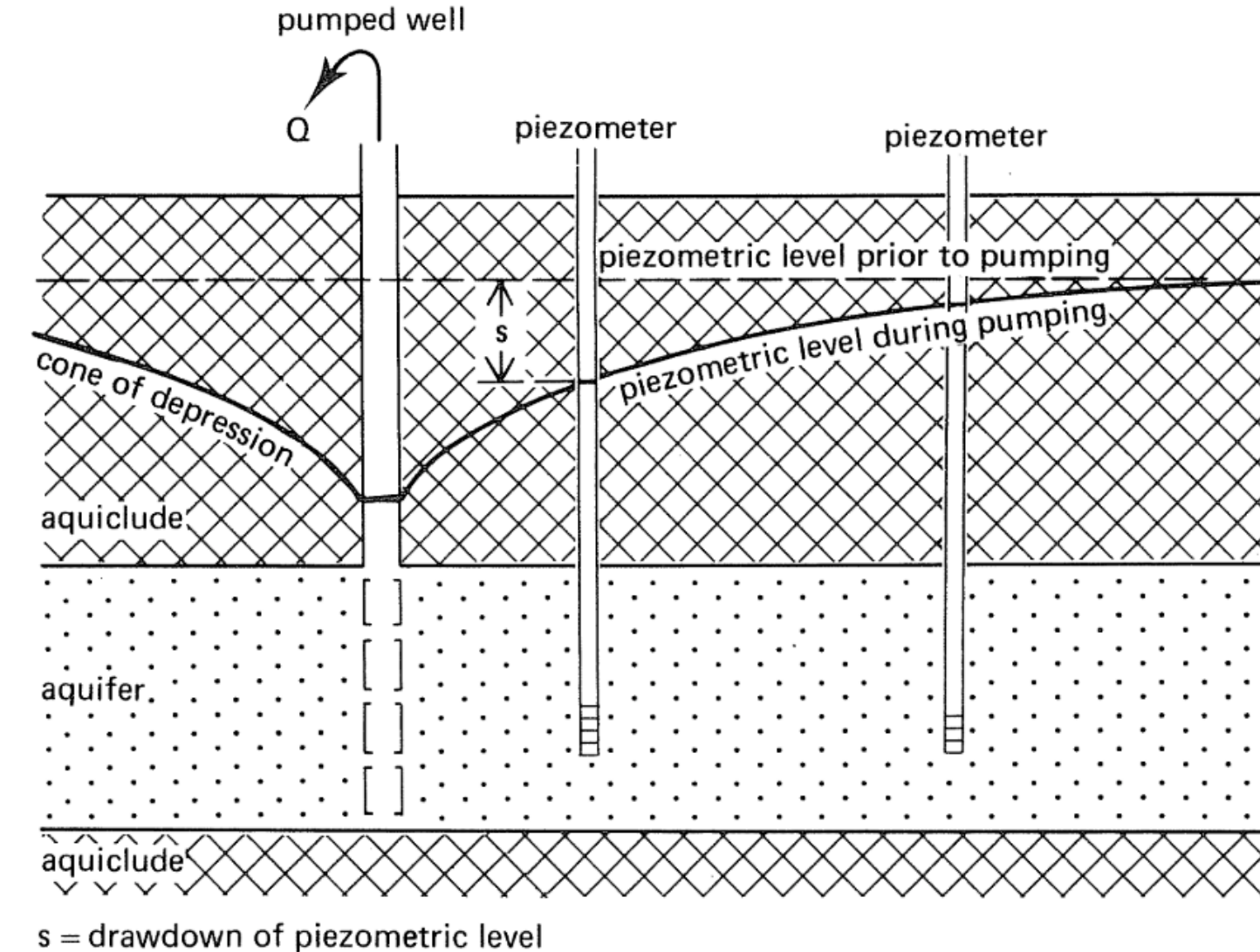
Méthodologie

Diagnostic de puits et modélisation des écoulements

Essai de pompage



Comment caractériser l'hétérogénéité et la géométrie des aquifères ?



Application classique par les bureaux d'étude

Acquisition des
données de terrain



Transmissivité +
coefficient d'emmagasinement +
conditions limites

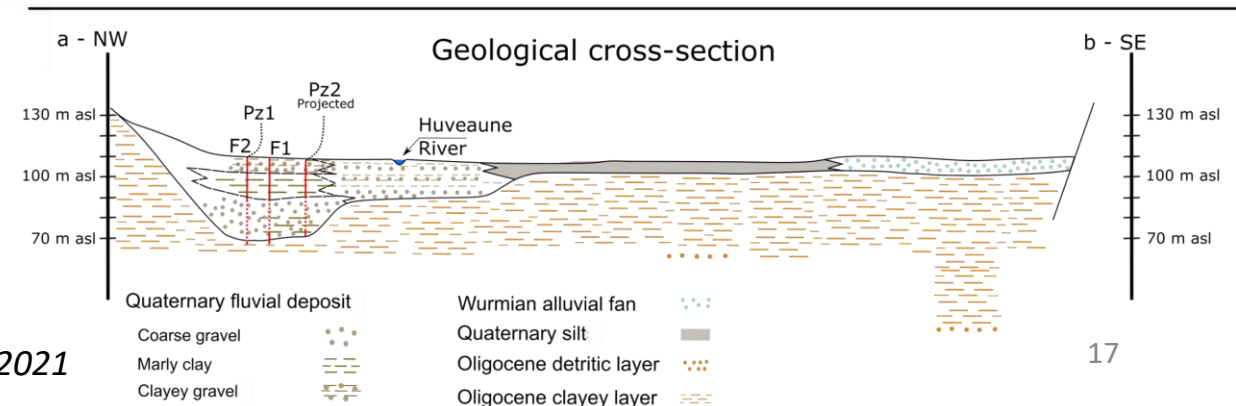
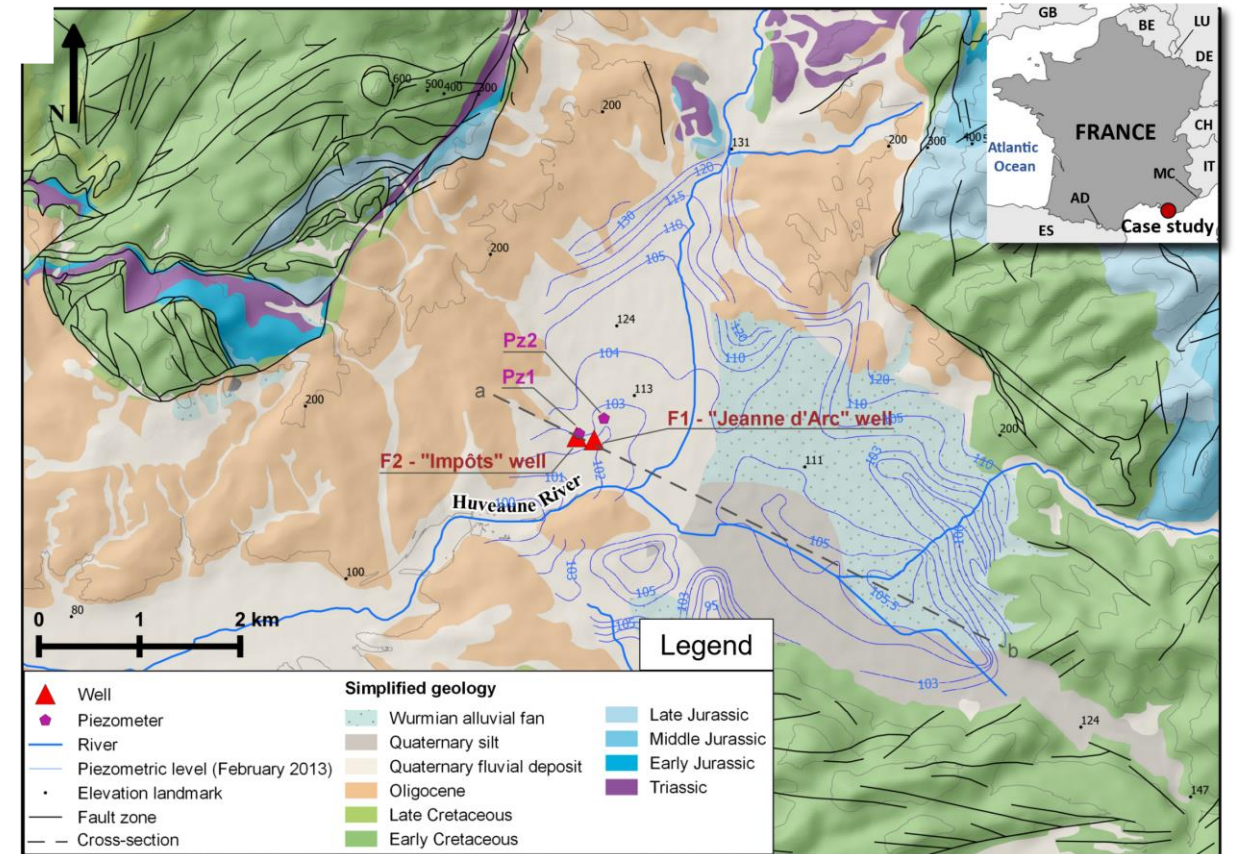
Réinterprétation d'un essai pour la méthode
des dérivées

➔ Identifier la géométrie des aquifères

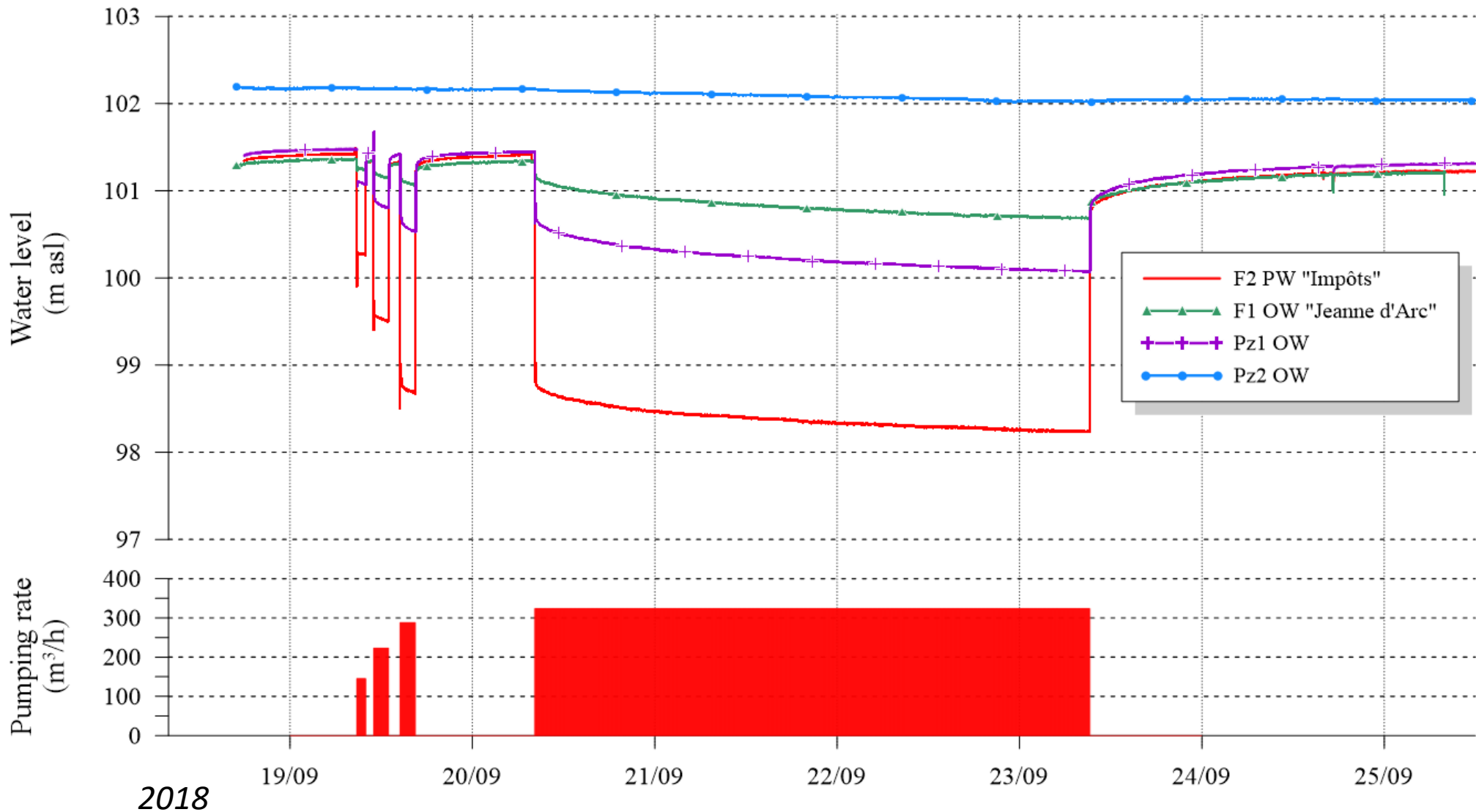
Acquisition des
données de terrain

Contexte hydrogéologique

- **Aquifère très productif et ressource locale de secours face au canal de Marseille**
- Un aquifère alluvial type multicouche
- Formation sédimentaire détritique du quaternaire
- Substratum oligocène considéré comme imperméable
- Nappe « profonde », entre 20 et 35m de profondeur, plus inertielle
- Un forage testé et trois points d'observation
- Article publié dans Hydrogeology Journal

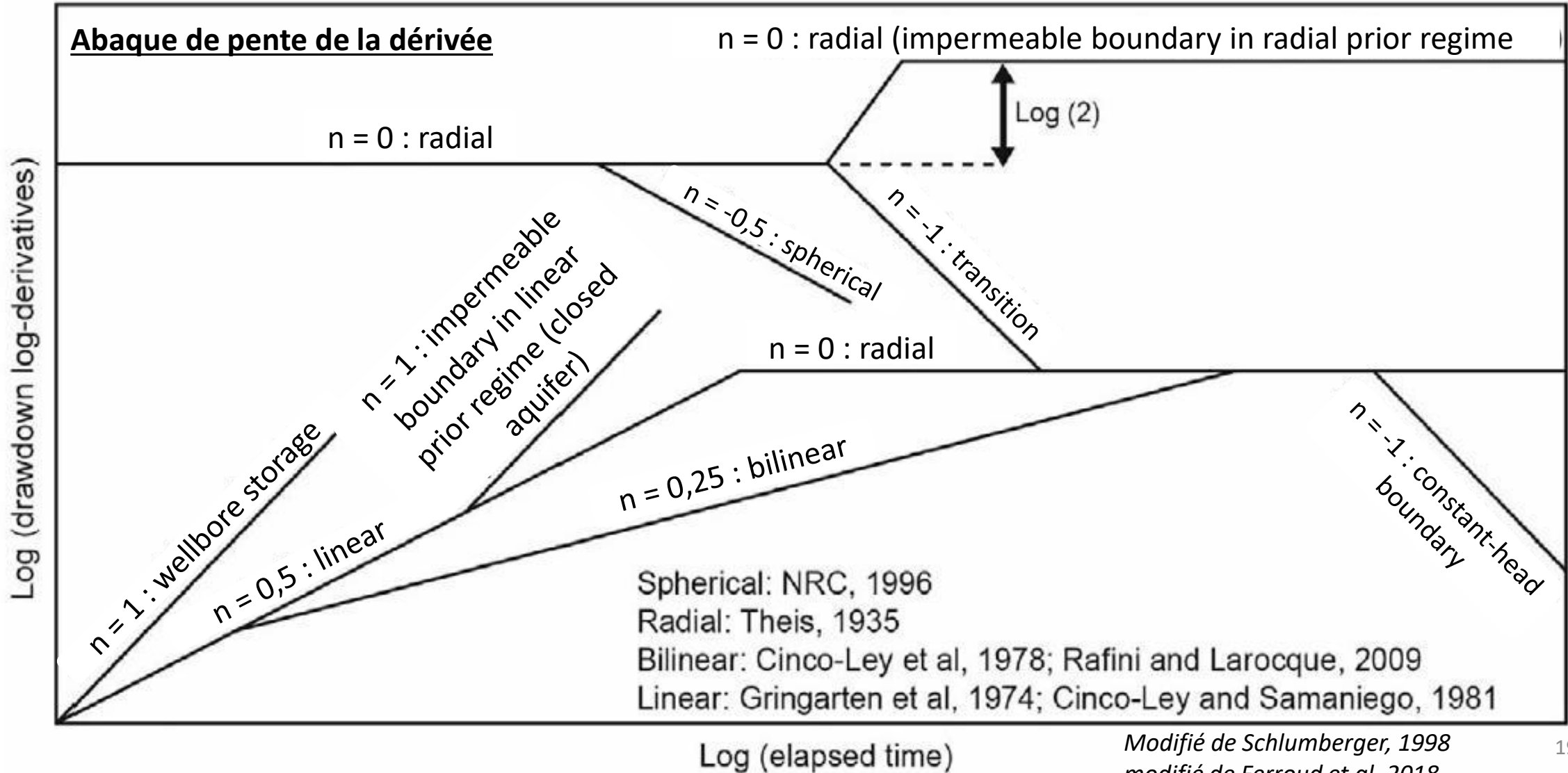
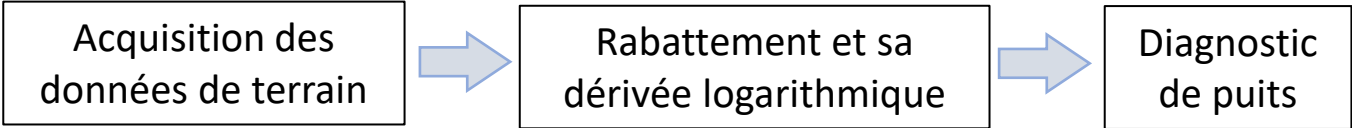


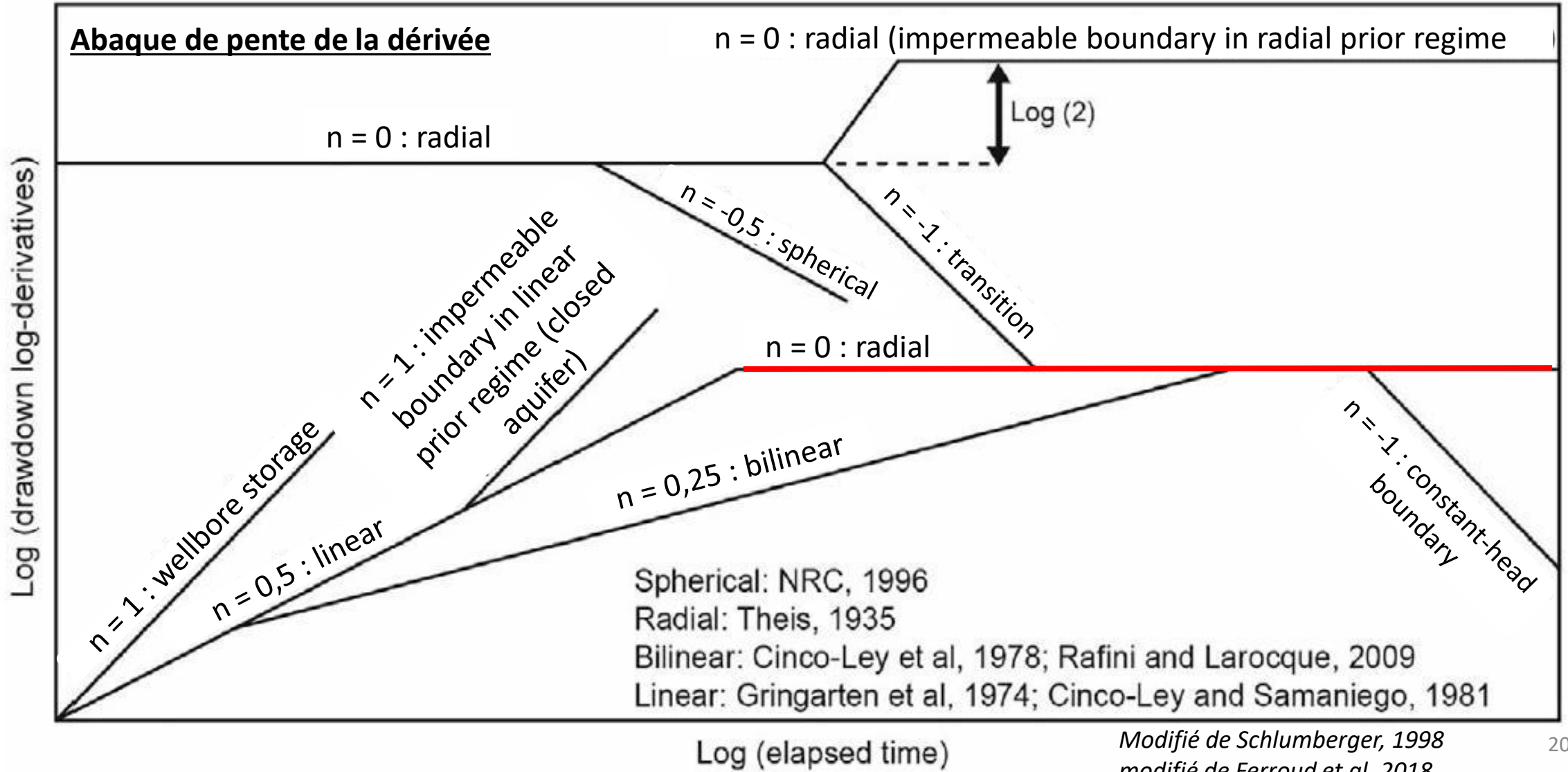
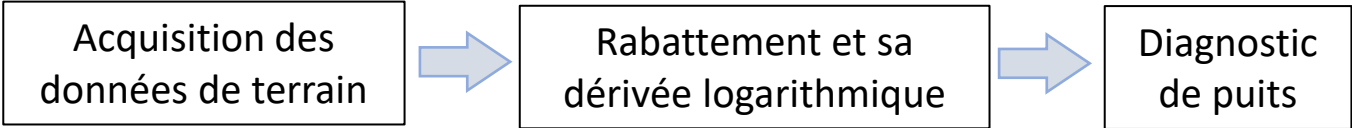
Acquisition des données de terrain

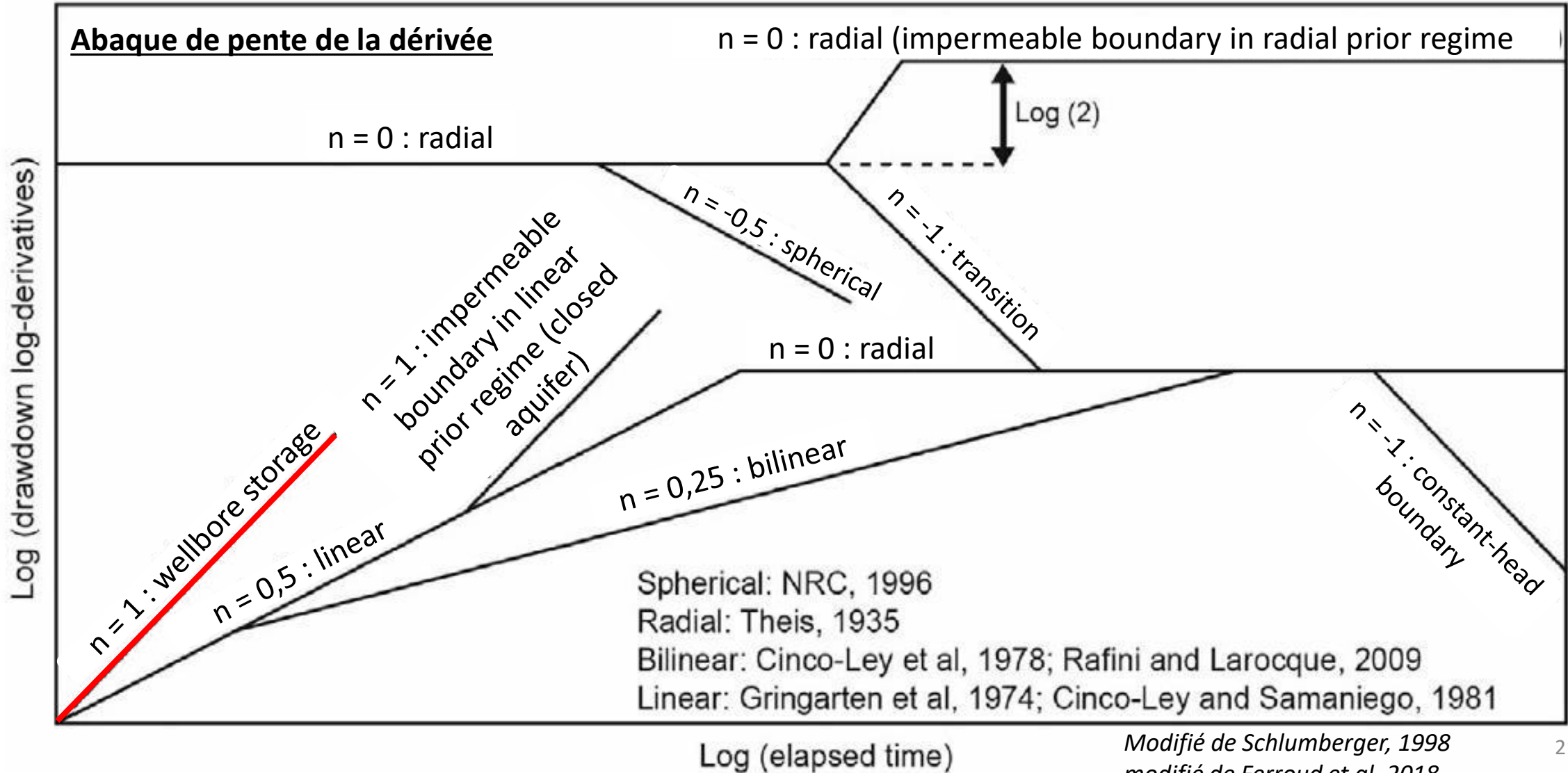
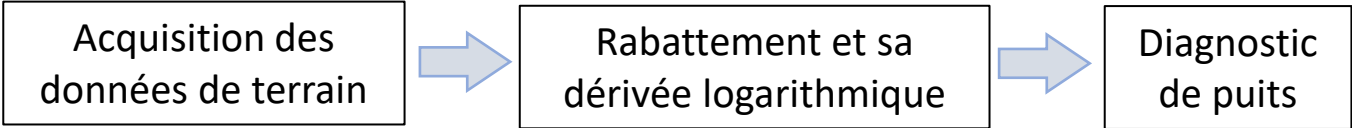


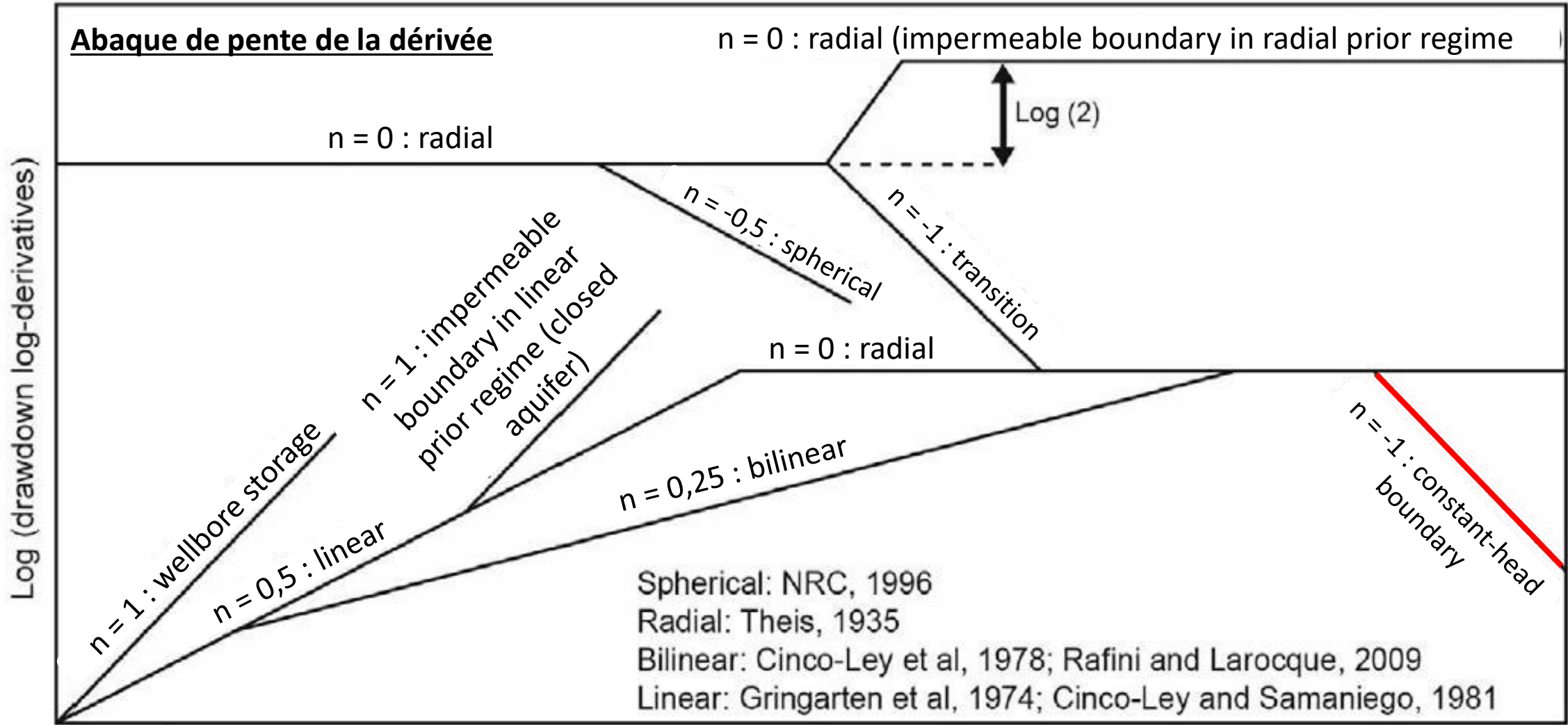
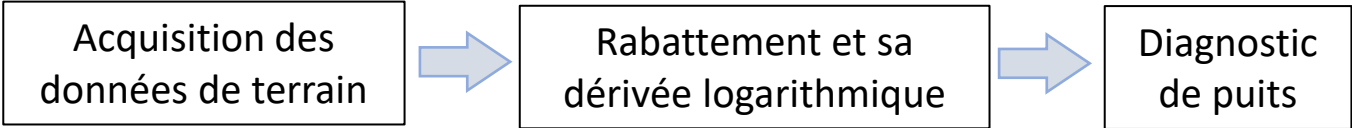
Données acquises en partenariat avec ANTEA et la SPL « Eaux des Collines »

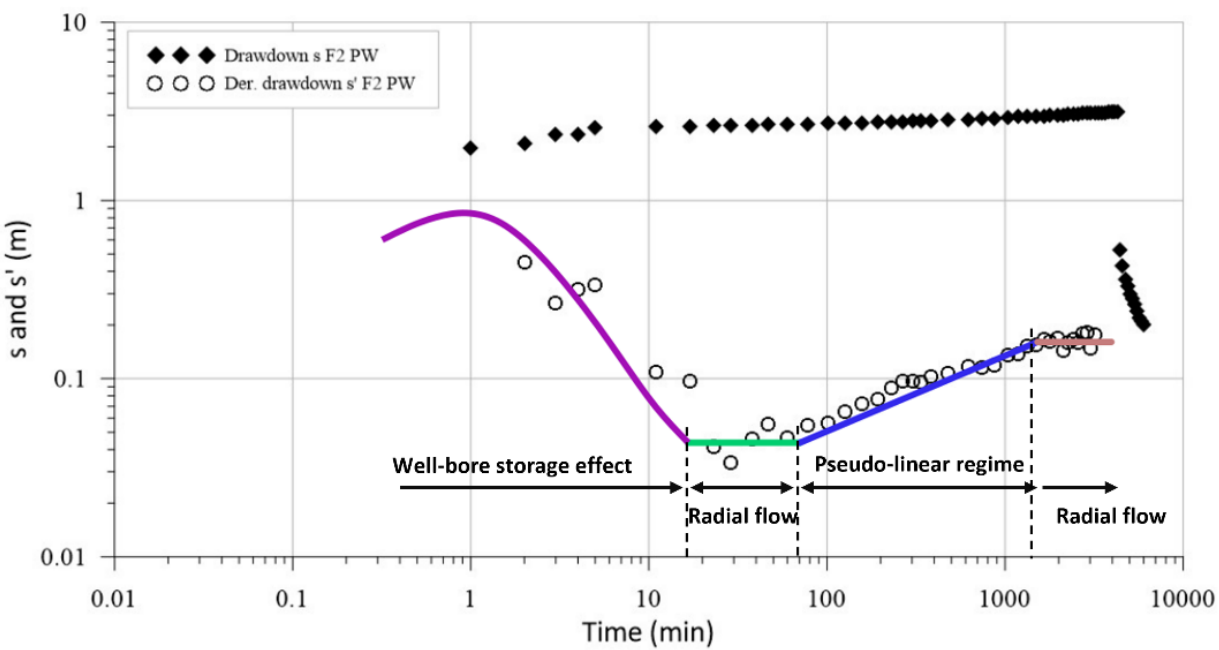
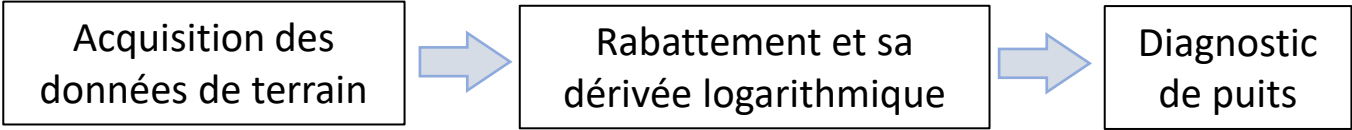






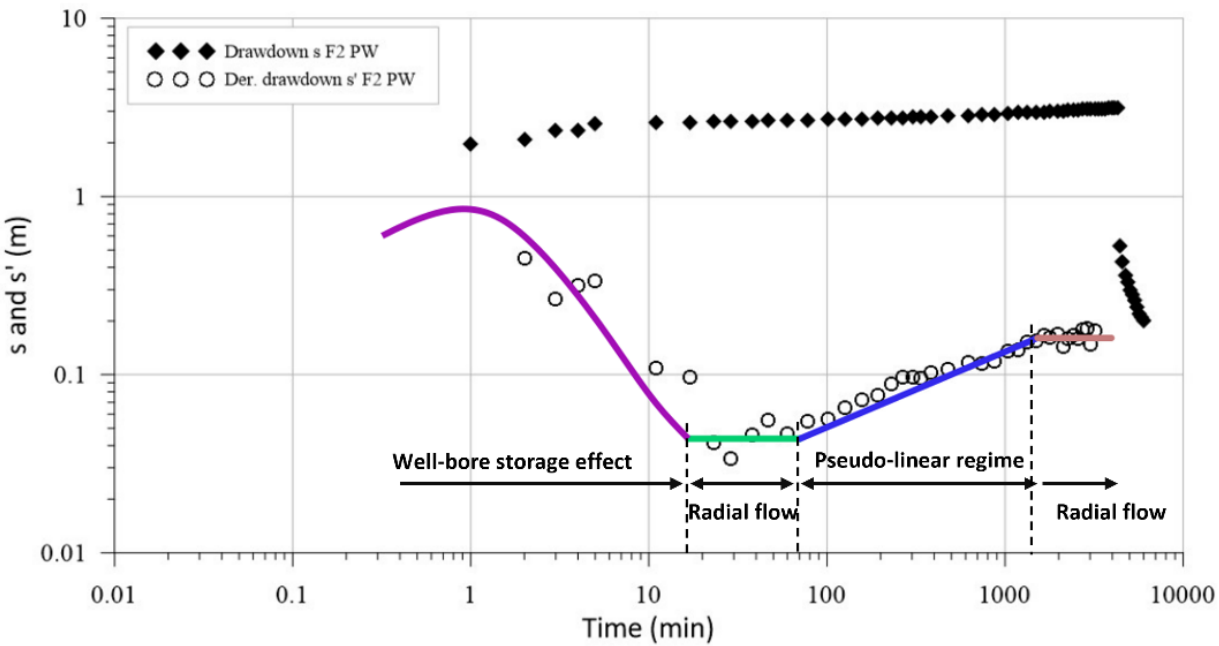
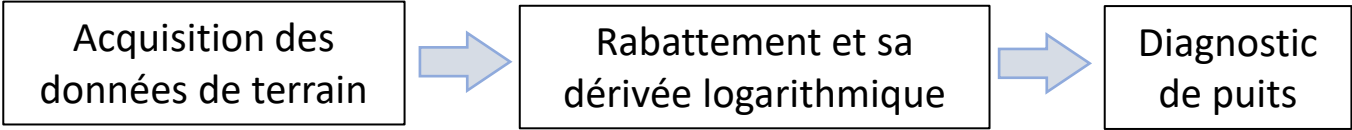






↓
Aquifère
compartimenté
verticalement

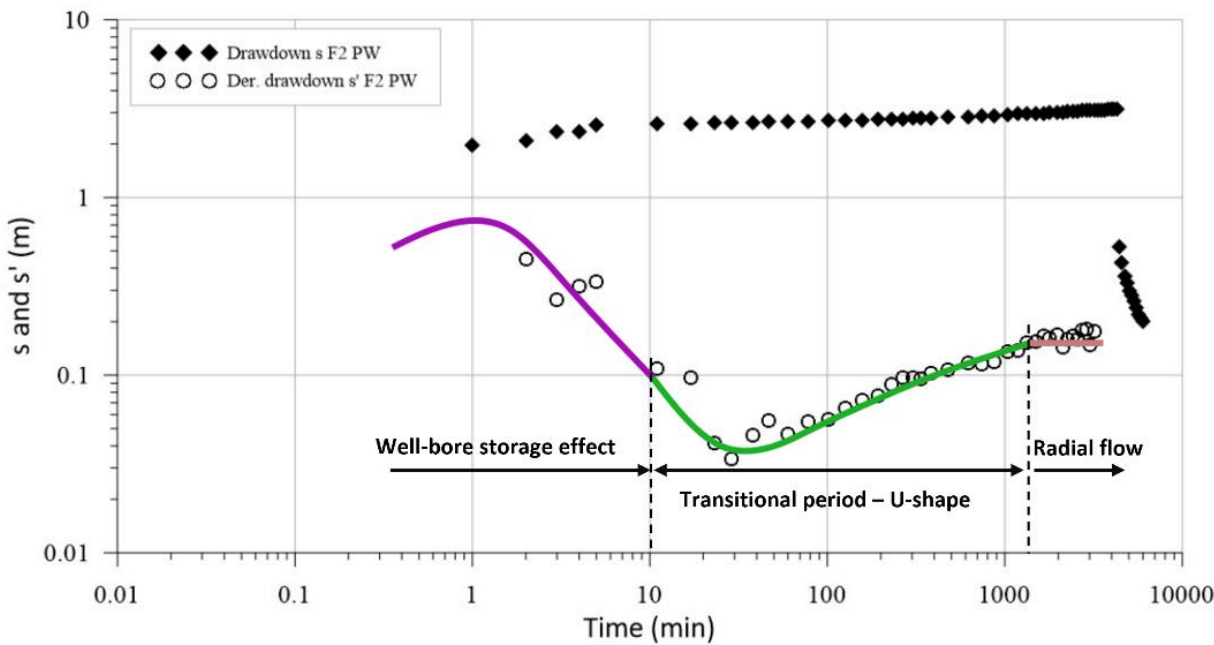
↓
Aquifère chenalisé avec
un effet de drainance



↓
Aquifère
compartimenté
verticalement

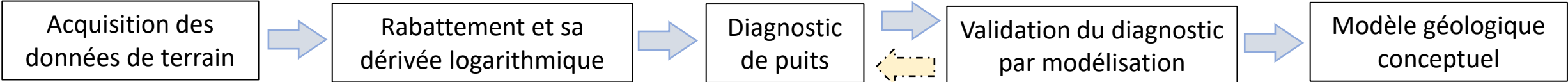
↓
Aquifère chenalisé avec
un effet de drainance

Caractère non univoque du diagnostic

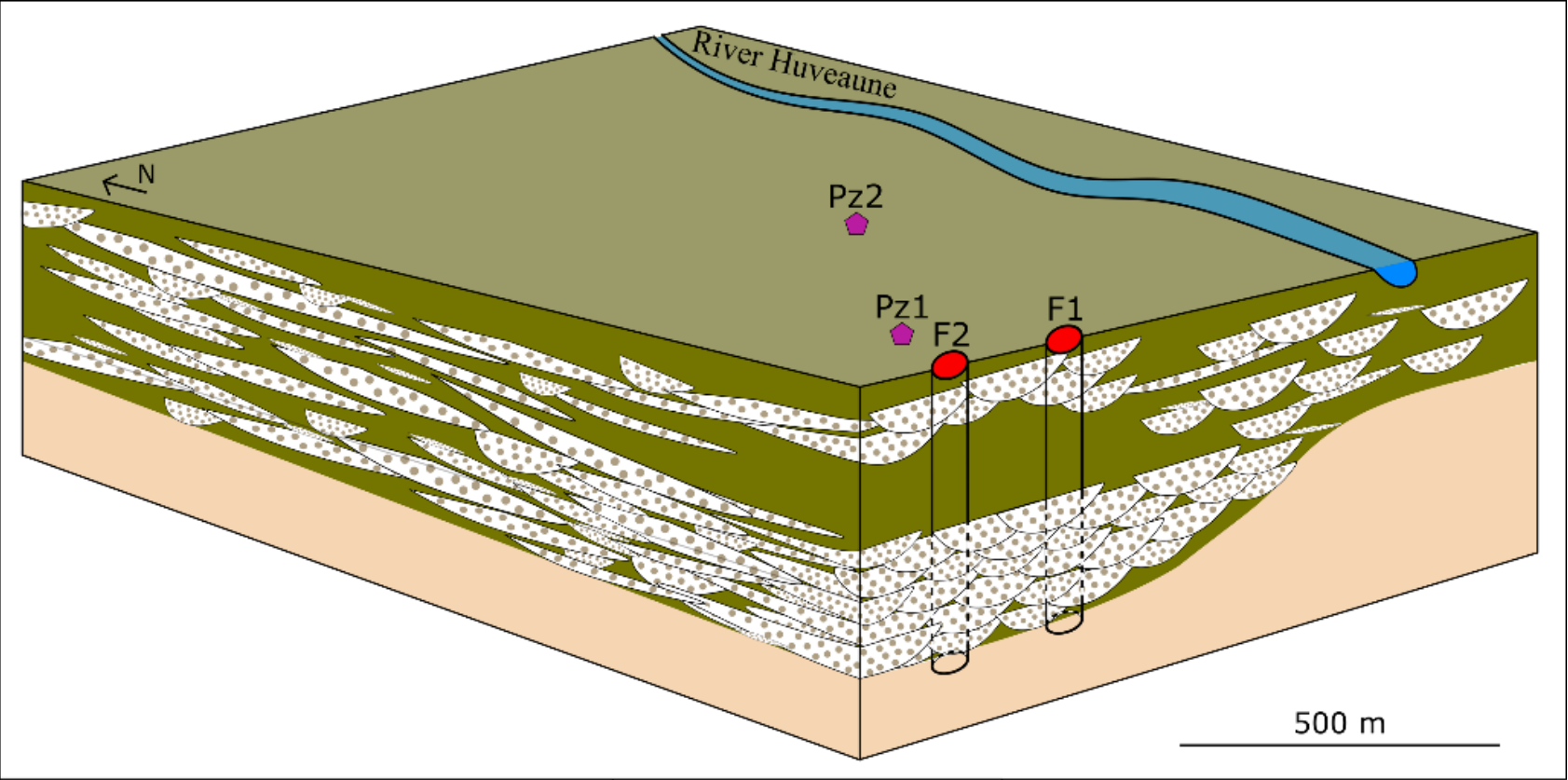


↓
Aquifère
double
porosité

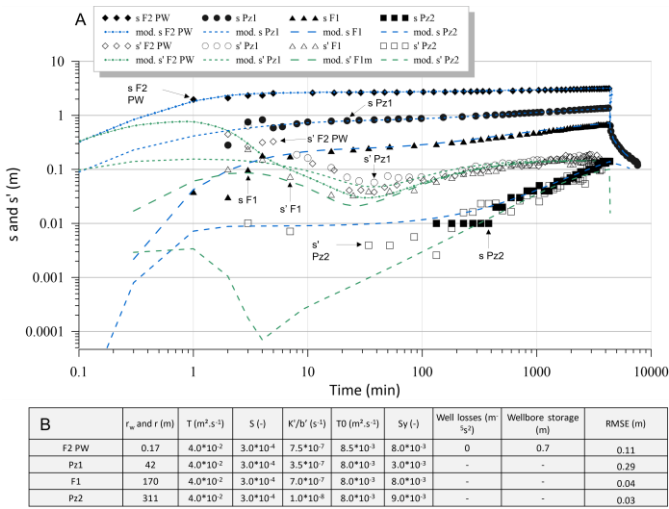
↓
Aquifère
double
perméabilité



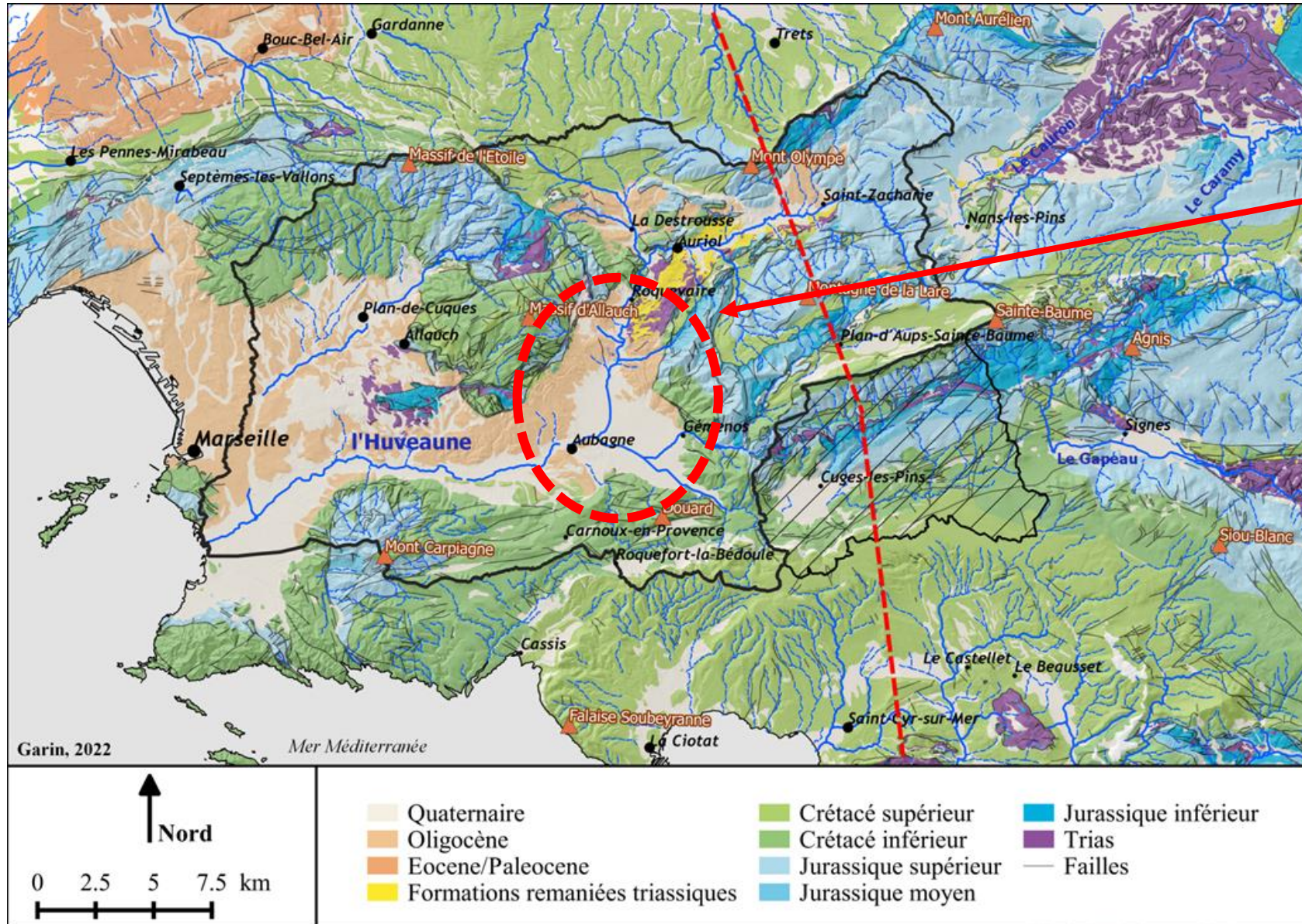
Nouveau diagnostic
si modélisation ne valide pas le 1er



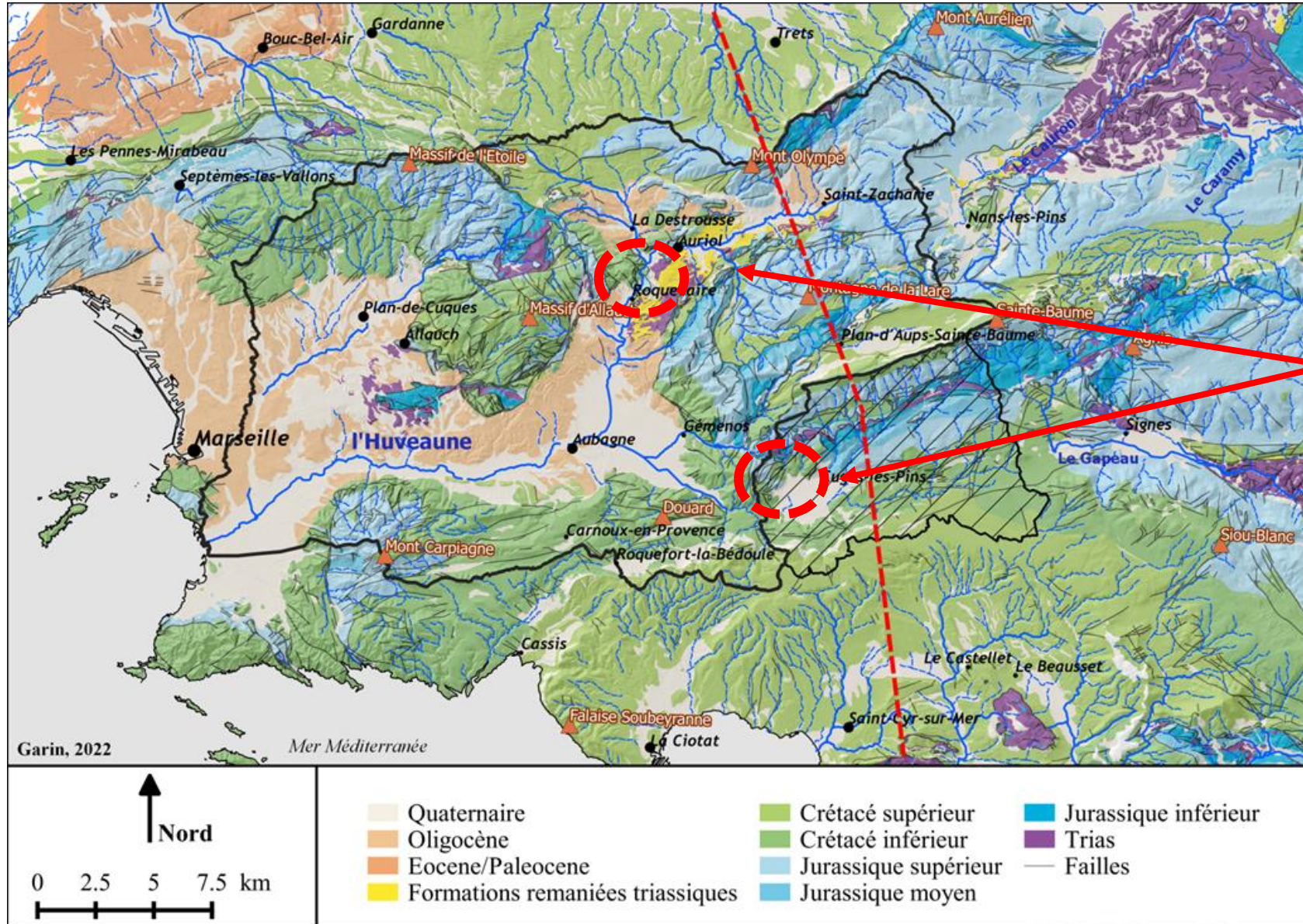
Informations
géologiques (log, ...)



- Validation du modèle double perméabilité
- Modèle géologique conceptuel d'après l'essai de pompage et les données géologiques
- Dynamique de mise en place de la plaine alluviale



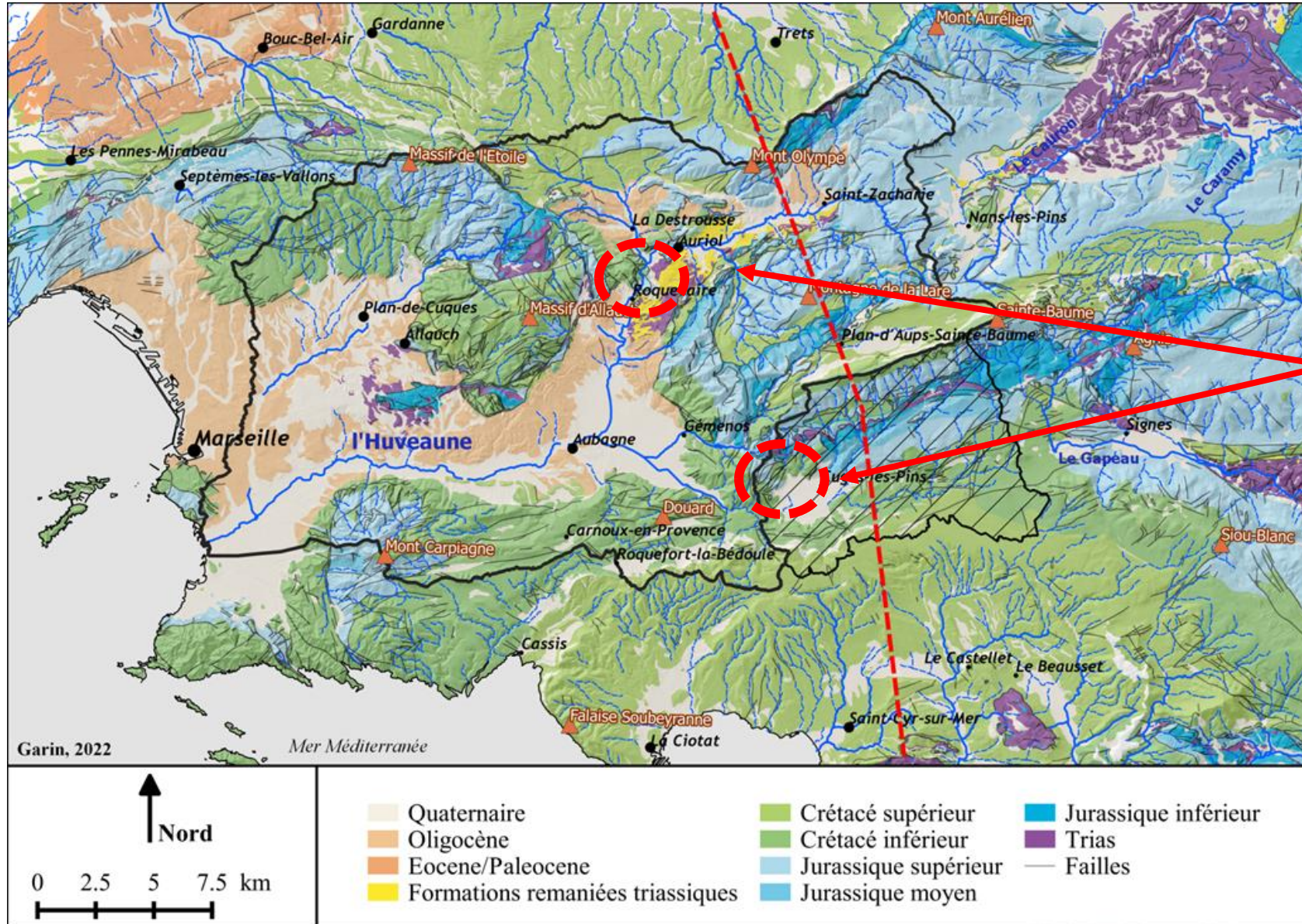
- Ressource importante au sein de la nappe alluviale d'Aubagne
- Forte hétérogénéité dépendant de la dynamique sédimentaire de formation de l'aquifère



Quelle est la géométrie des aquifères karstiques ?

Quelles ressources dans le karst ?

- Forage Puyricard à Cuges-les-Pins
Zone de faille / fractures
Relation avec le poljé ?
- Forage F2017 à Roquevaire
Karst sous le niveau de l'Huveaune
Échange entre karst, alluvions et rivière

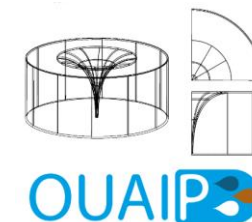


Quelle est la géométrie des aquifères karstiques ?

Quelles ressources dans le karst ?

- Forage Puyricard à Cuges-les-Pins
Zone de faille / fractures
Relation avec le poljé ?
- Forage F2017 à Roquevaire
Karst sous le niveau de l'Huveaune
Échange entre karst, alluvions et rivière

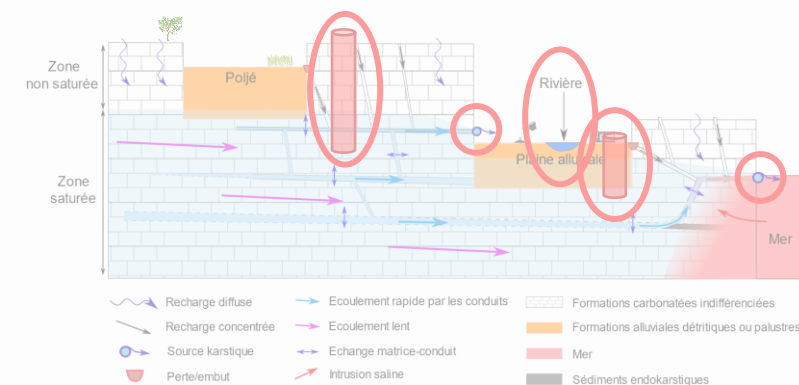
Comment démocratiser la méthode des dérivées ?



Quelle est la signature géochimique des masses d'eau ?

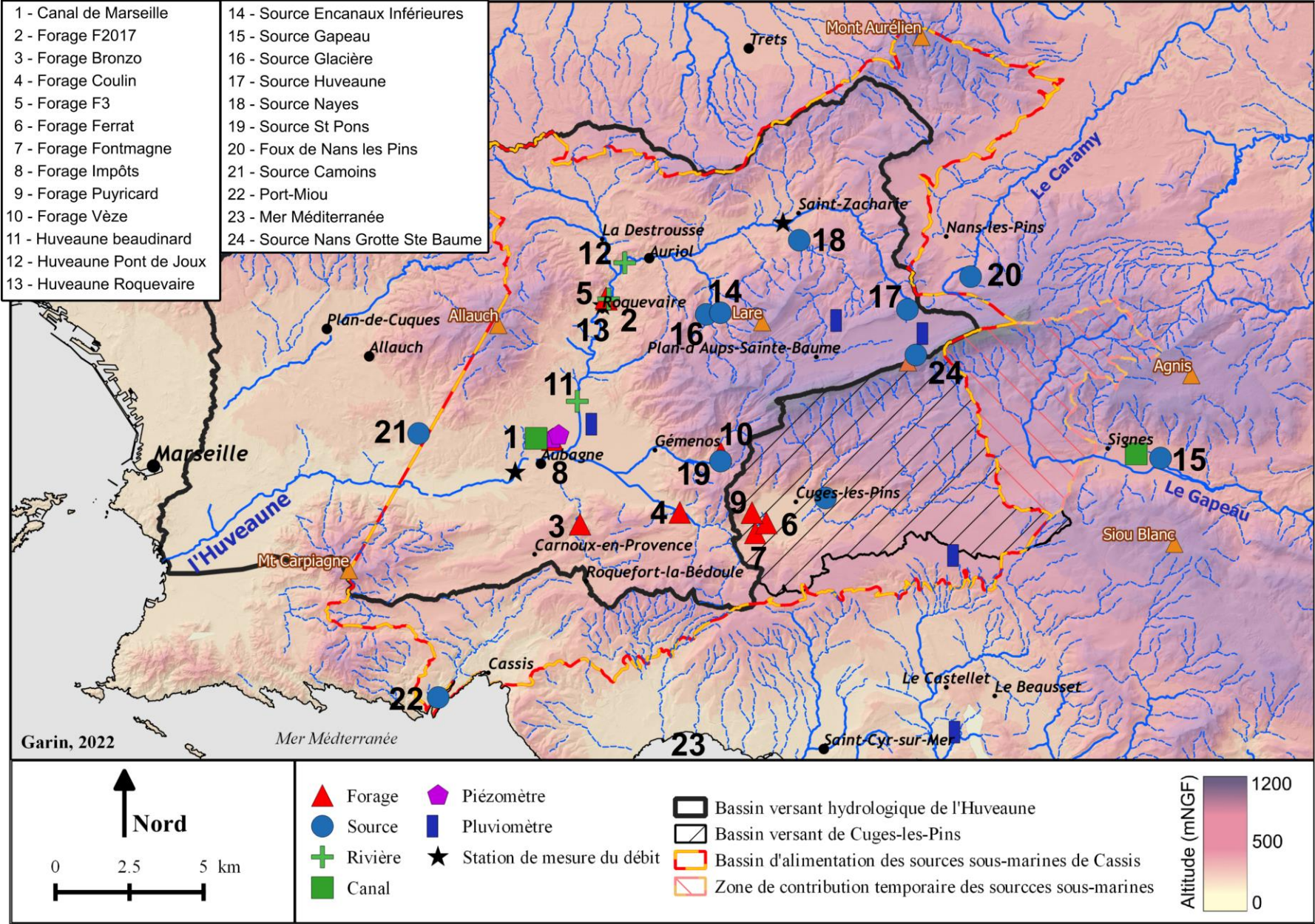
Traçages naturels à l'aide des ions majeurs et des outils isotopiques ($d^{18}O$, d^2H ; $^{87}Sr/^{86}Sr$; $d^{34}S_{SO4}$)

Suivi spatial et temporel



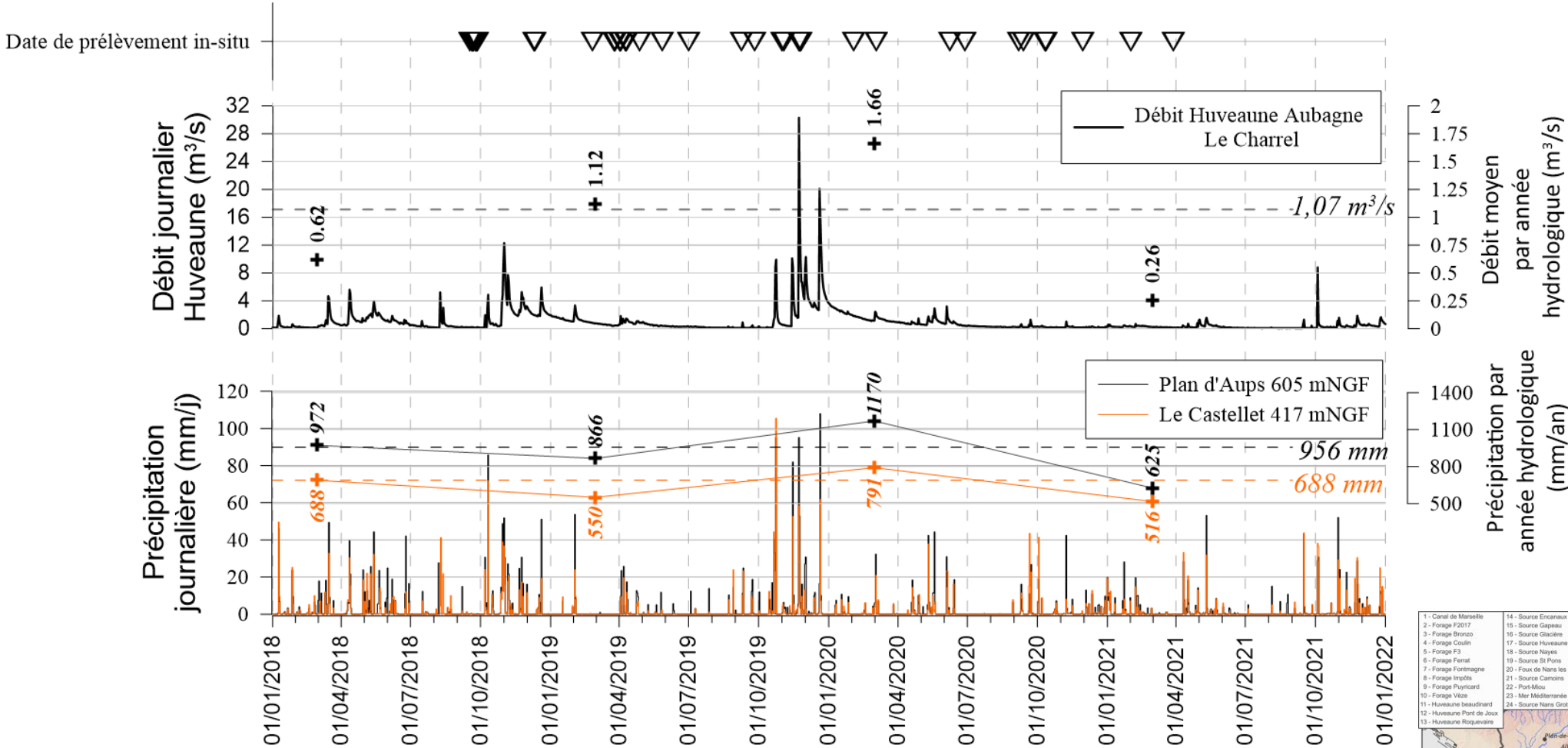
Quelle est la signature géochimique des masses d'eau ?

Comment l'approche multi-traceurs permet d'identifier les mélanges entre masses d'eau ?



24 points de prélèvements

- 10 sources
- 9 forages
- 3 points sur l’Huveaune
- 1 sur le canal de Marseille

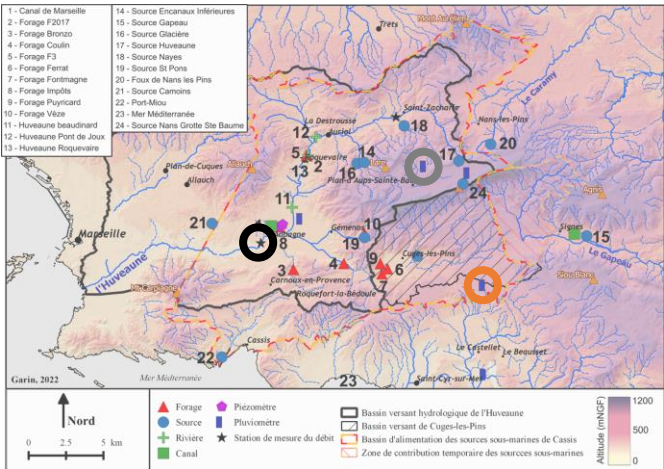


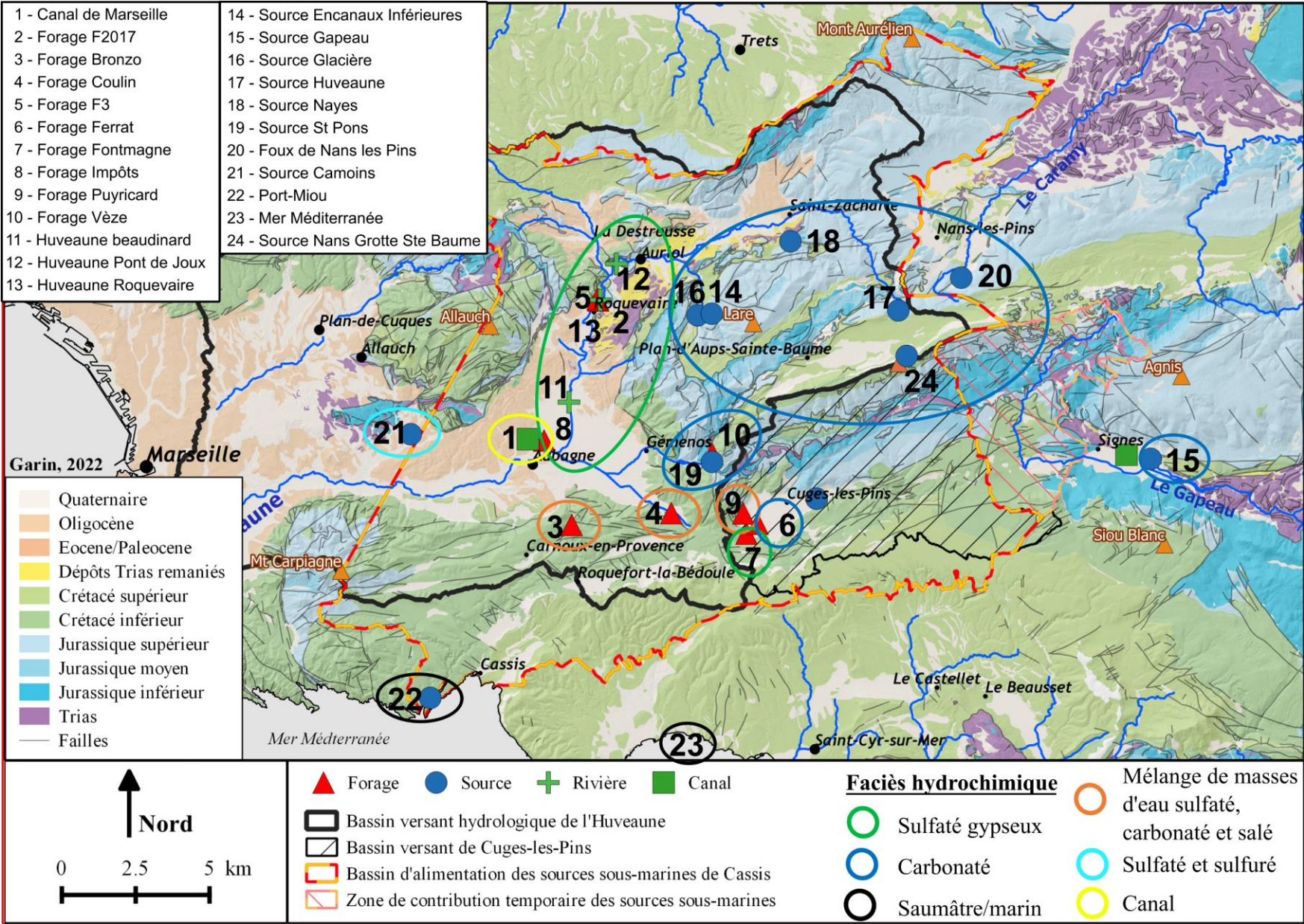
Période d'étude entre septembre 2018 et janvier 2022

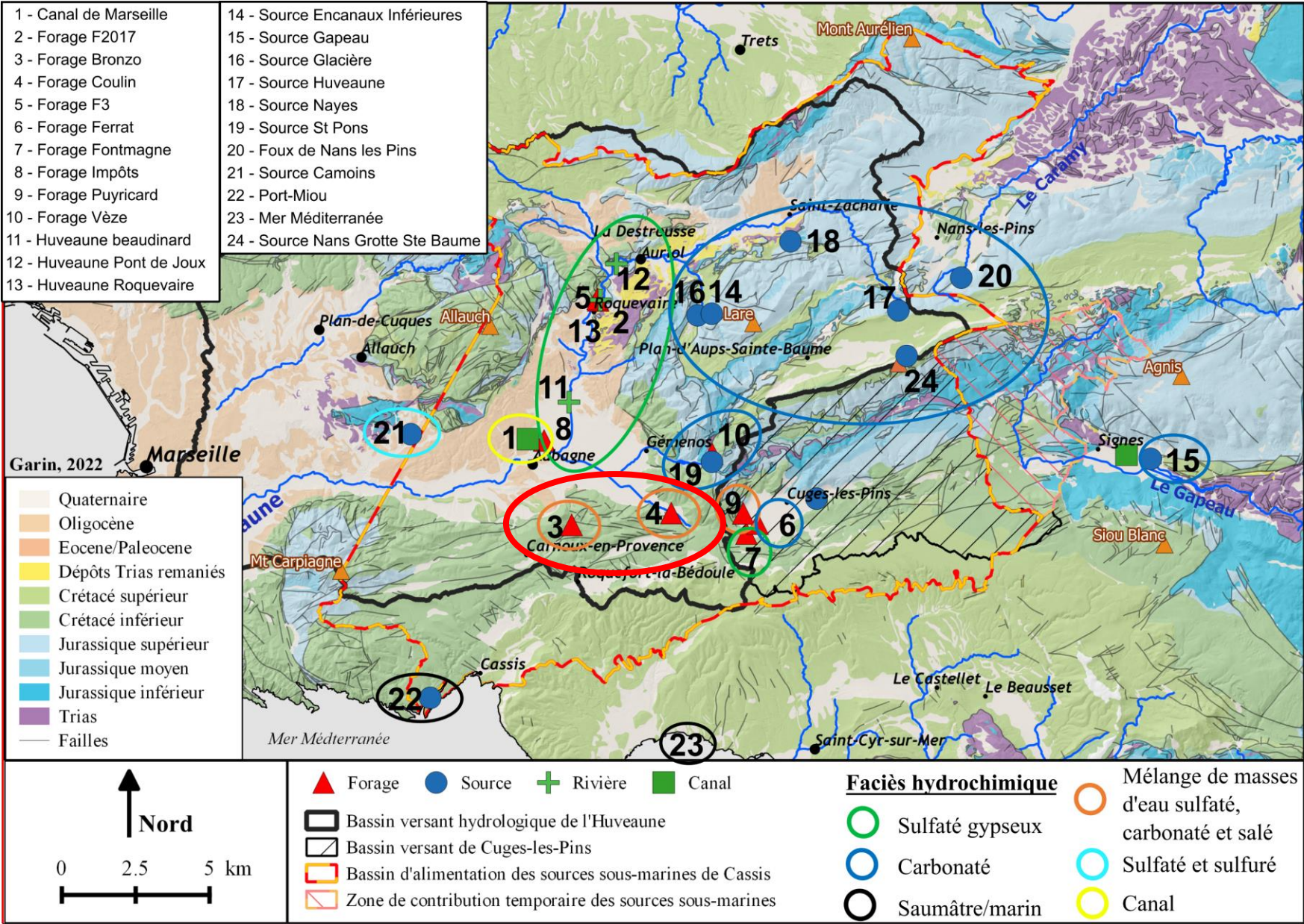
- Prélèvements en hautes eaux, basses eaux et moyenne eaux
- Représentatif par rapport à la variabilité temporelle sur 10 ans

Nombres d'analyses

- 265 -ions majeurs, 99 - $d^{18}O$ et d^2H , 64 - $^{87}Sr/^{86}Sr$, 12 - $d^{34}S$

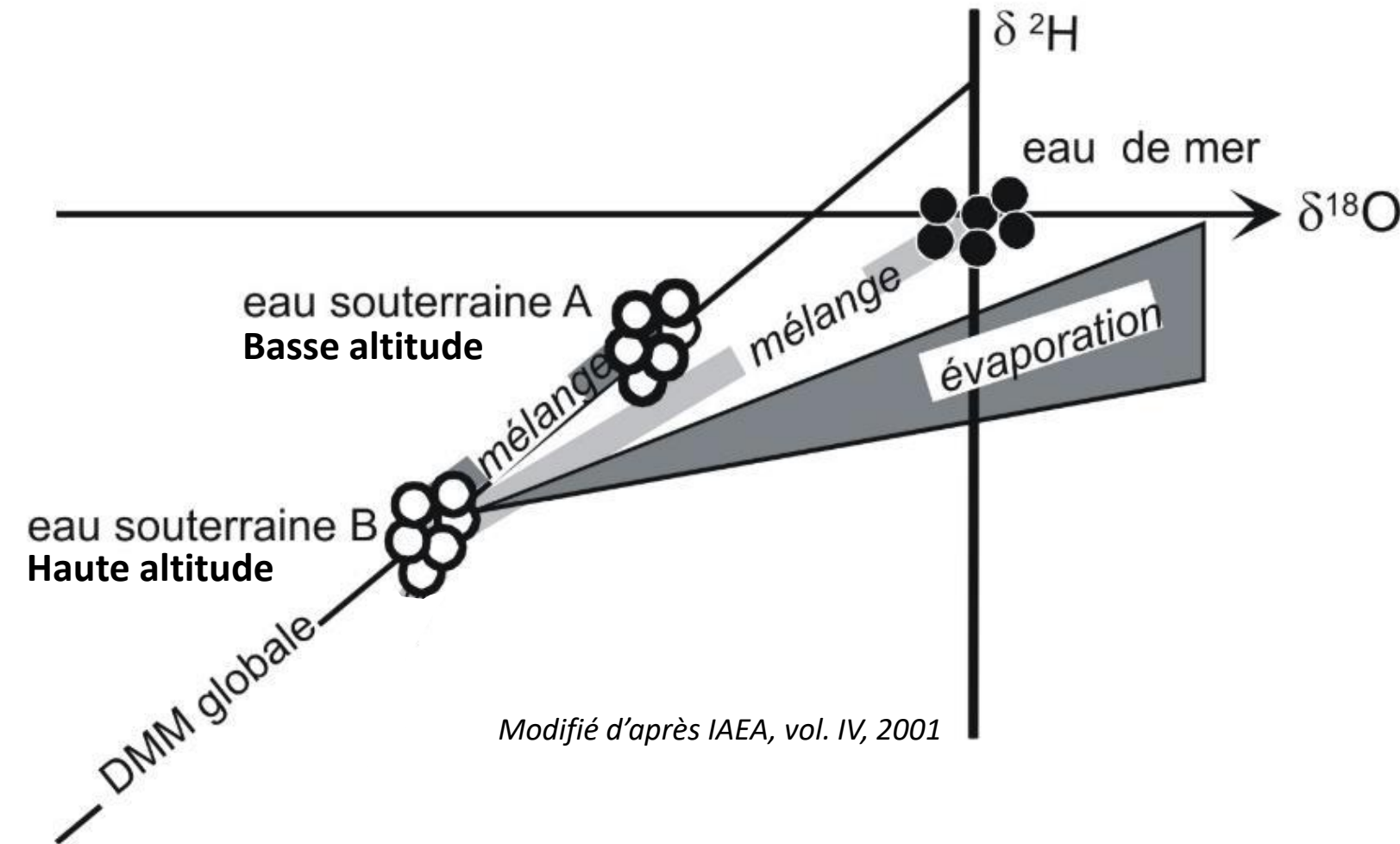






Faciès hydrochimique

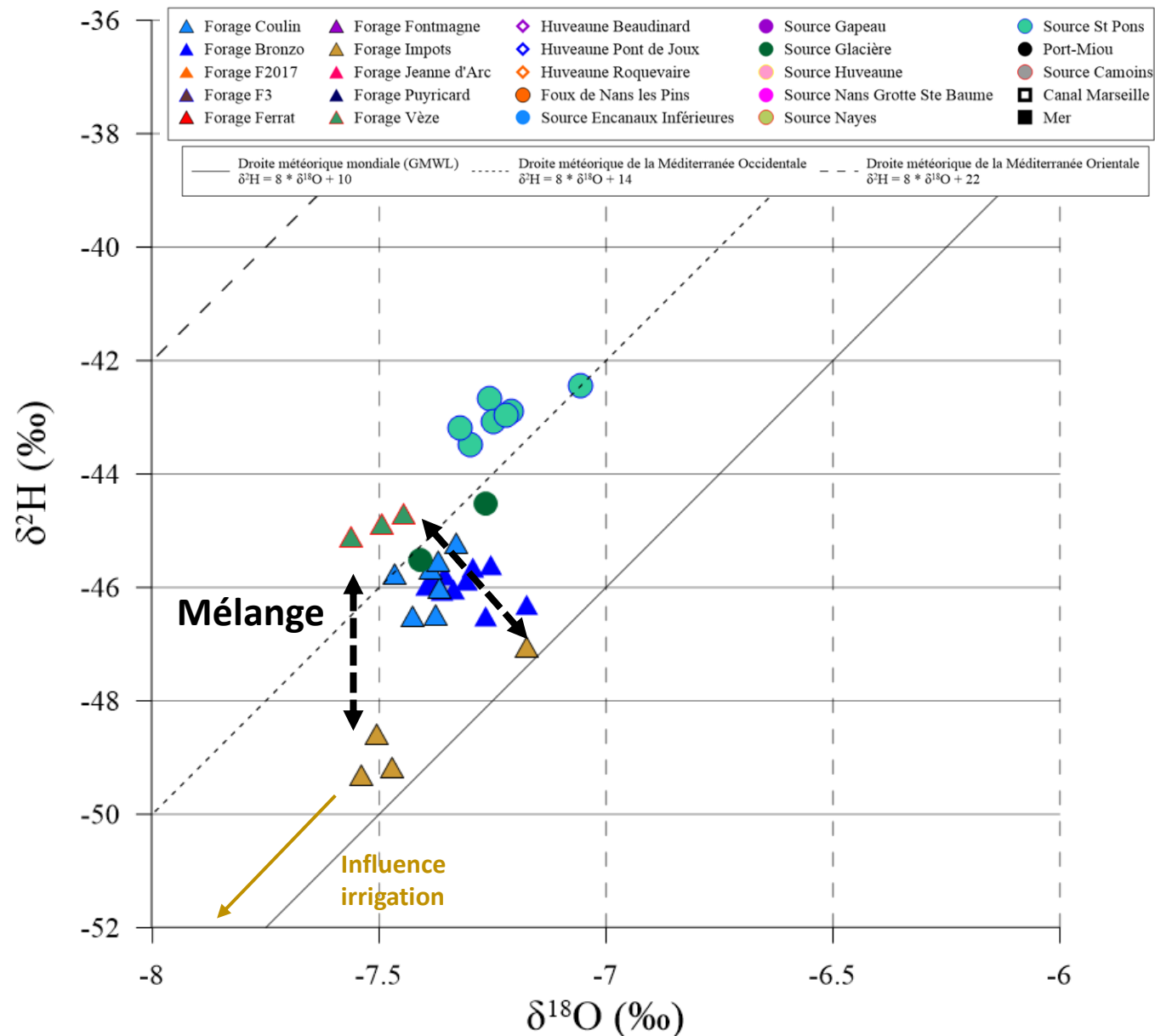
- Sulfaté gypseux
- Carbonaté
- Saumâtre/marin
- Canal d'irrigation
- Mélange masses d'eau régionales



Modifié d'après IAEA, vol. IV, 2001

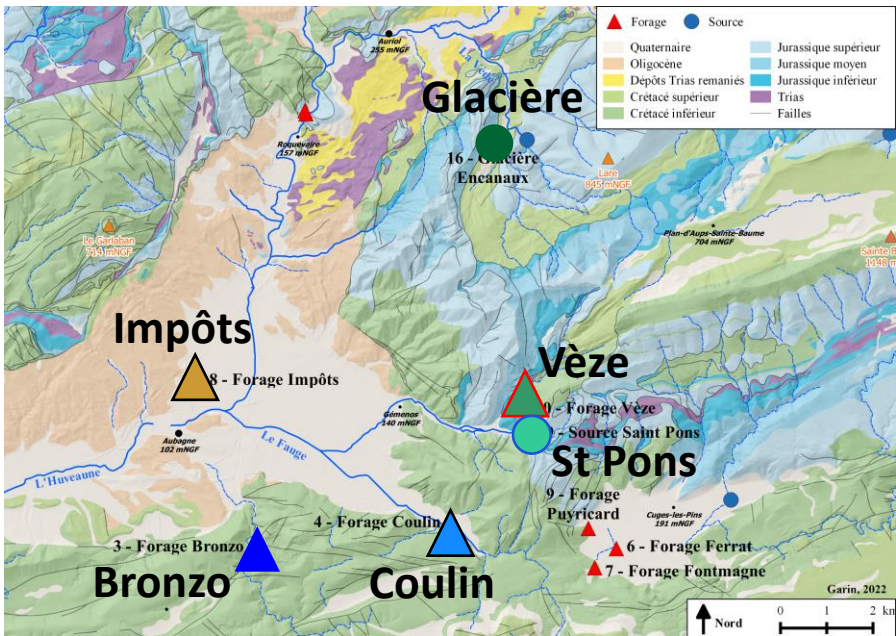
Intérêt des isotopes stables de l'eau

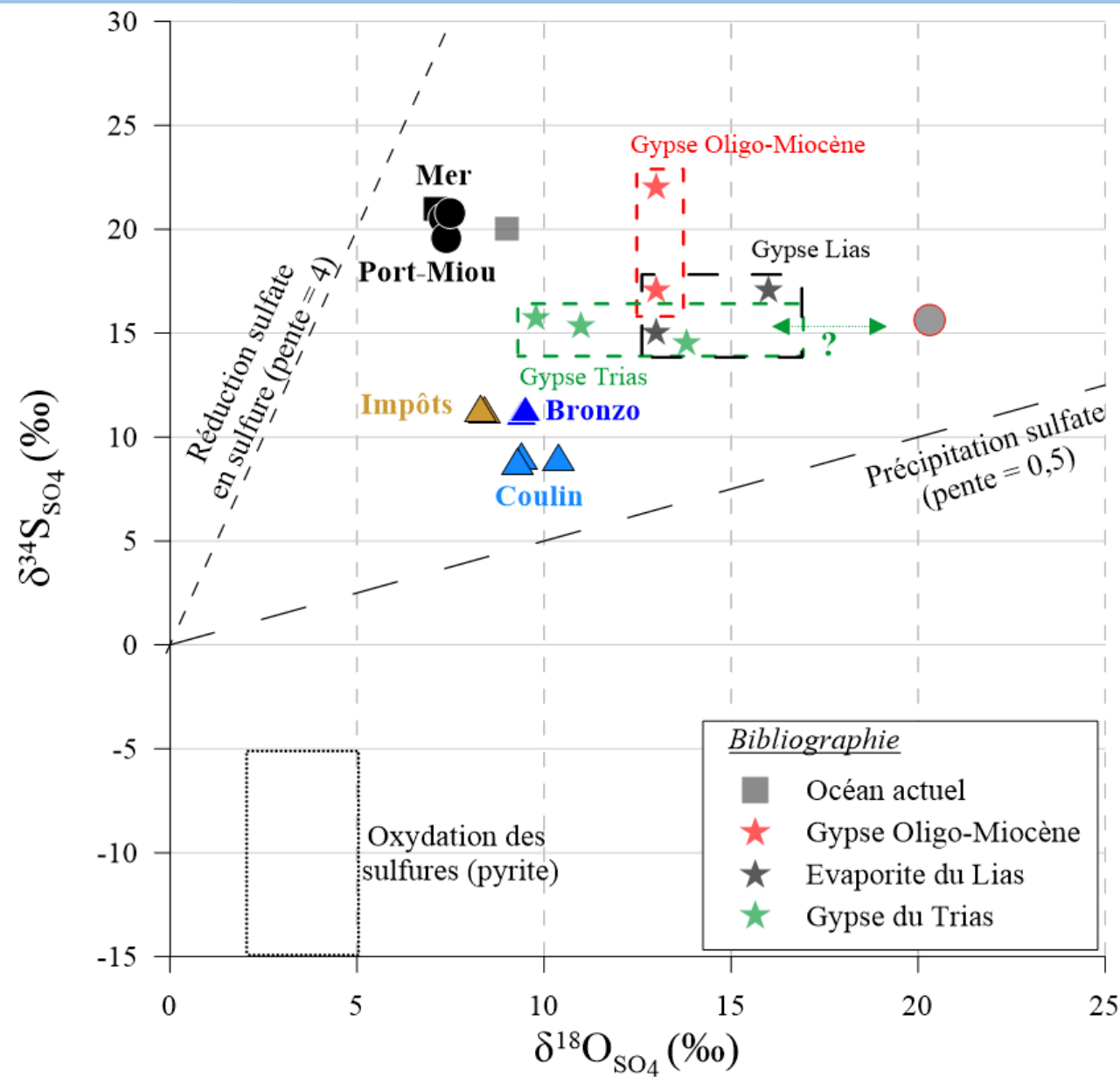
- Rapport isotopique $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ de la molécule d'eau
- Traceur de la recharge et des zones d'alimentation des eaux souterraines (effet d'altitude)
- Subi des processus de fractionnement notamment lors de l'évaporation
- **Traceur de mélange entre masse d'eau**



La plaine d'Aubagne se décharge-t-elle vers le sud et le massif des Calanques ?

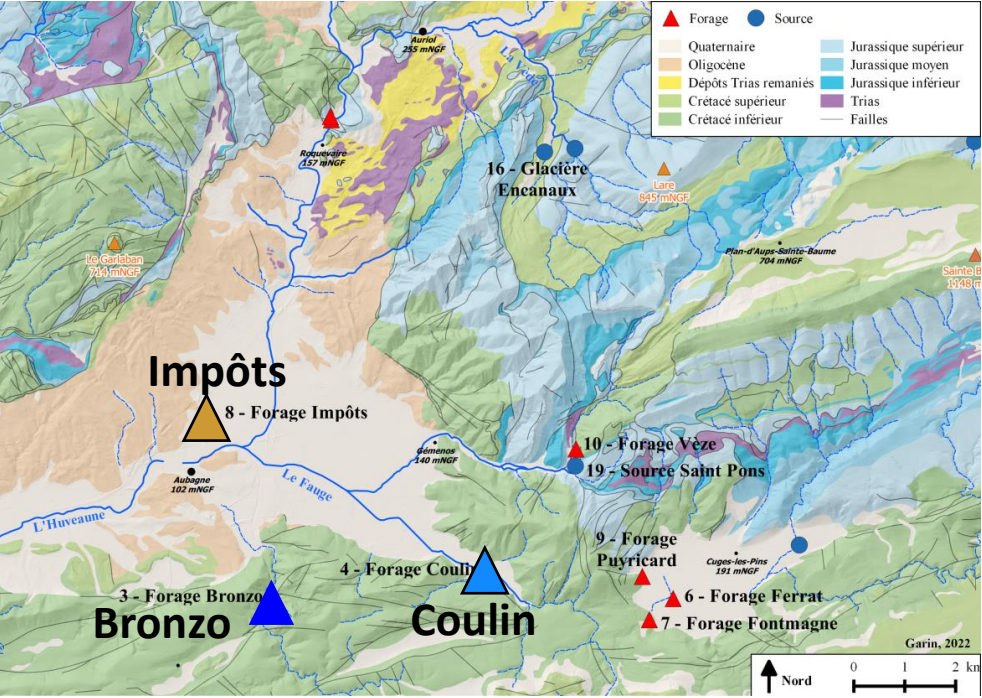
- Mélange de masse d'eau régionale
- Alimentation des forages Bronzo et Coulin par la masse d'eau de la plaine d'Aubagne et une masse d'eau venant de la Sainte-Baume

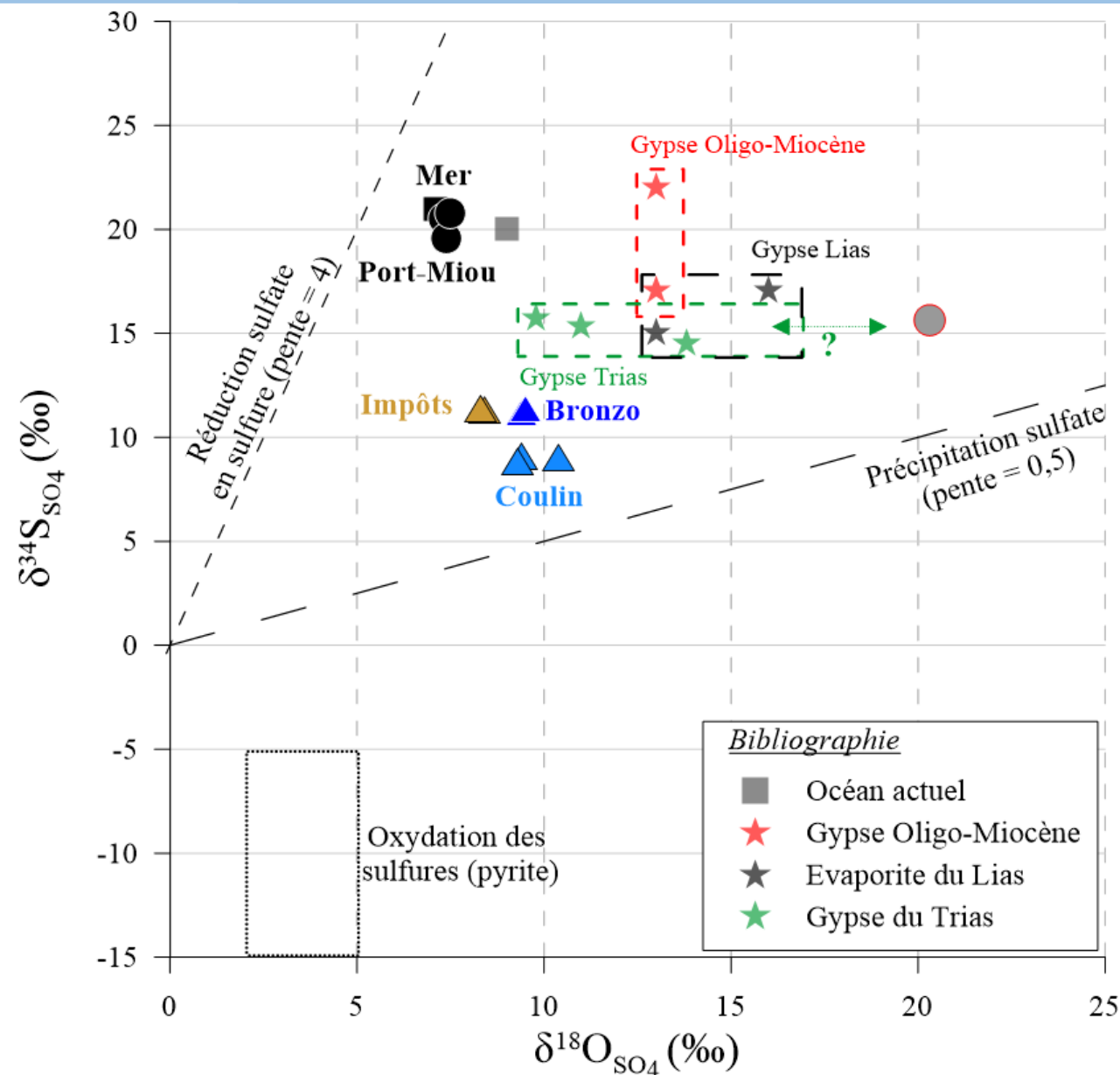




Intérêt du traceur

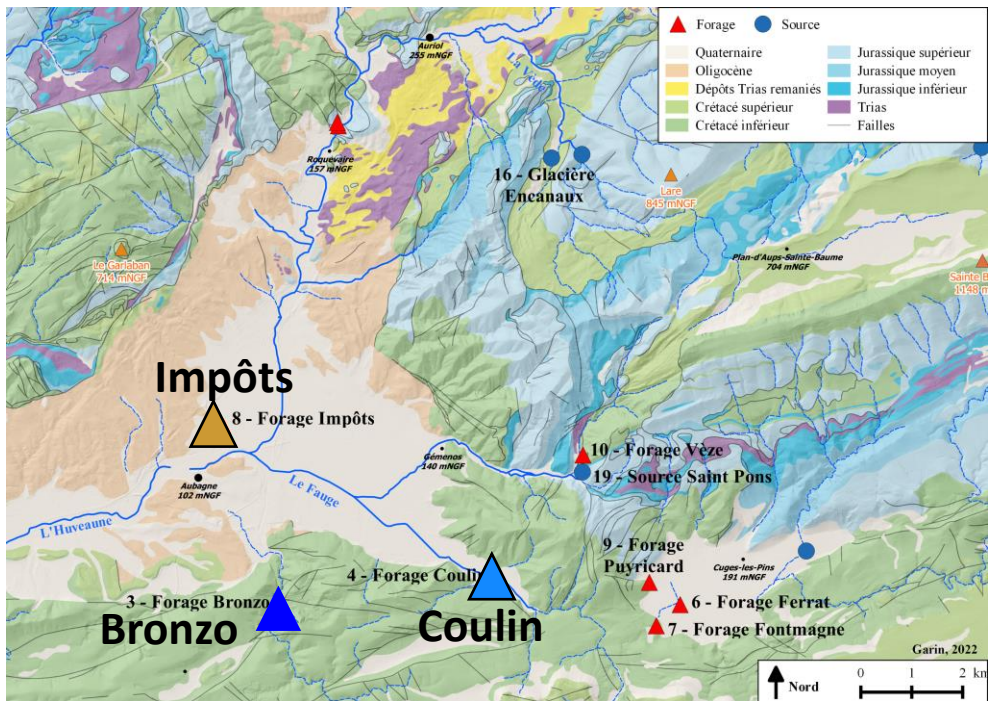
- Rapport isotopique $\delta^{34}\text{S}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des sulfates
- Traceur de l'origine des sulfates
- Traceur de mélange entre masse d'eau

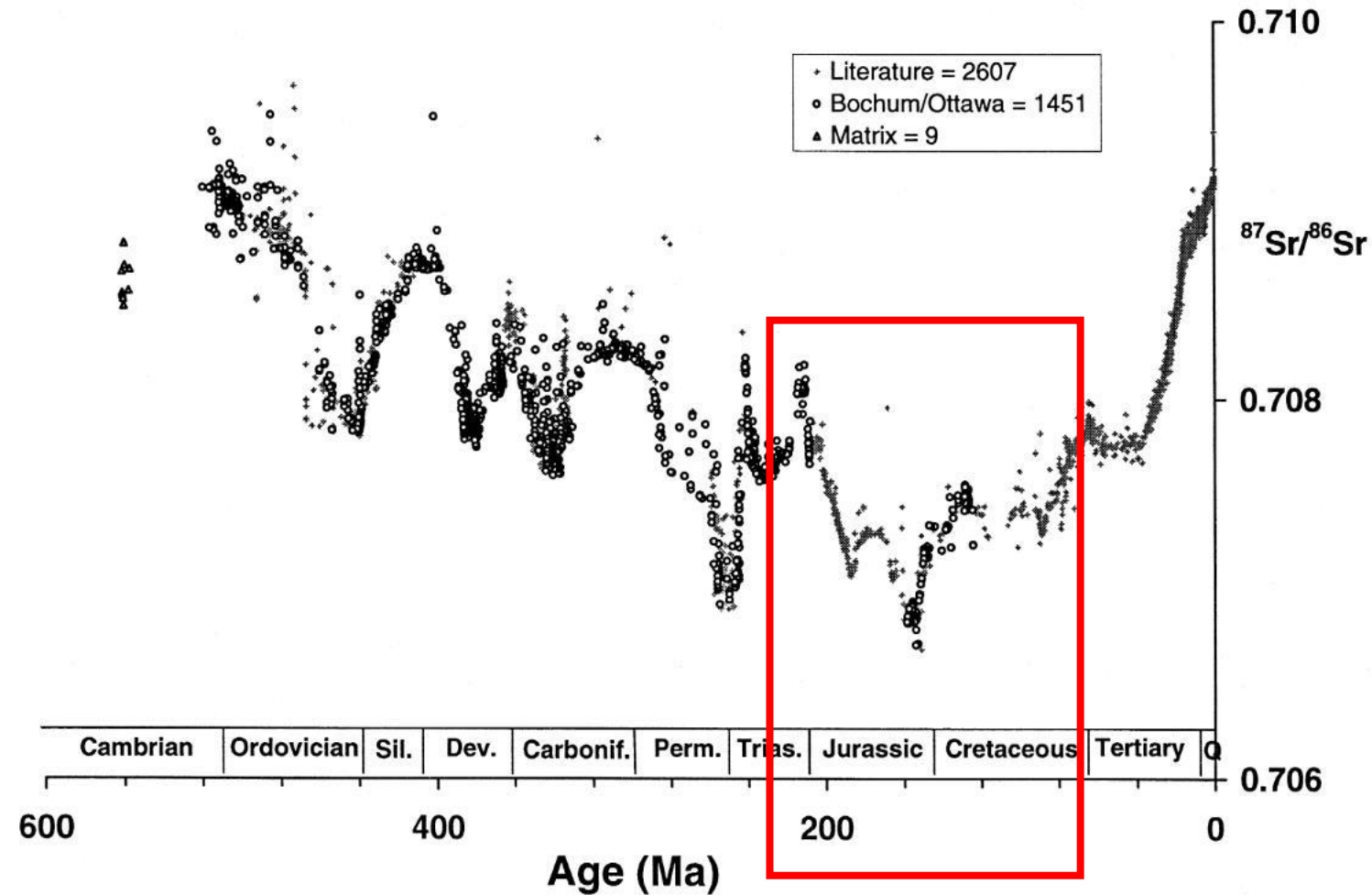




La plaine d'Aubagne se décharge-t-elle vers le sud et le massif des Calanques ?

- Origine des sulfates sur la plaine et le forage Bronzo similaire

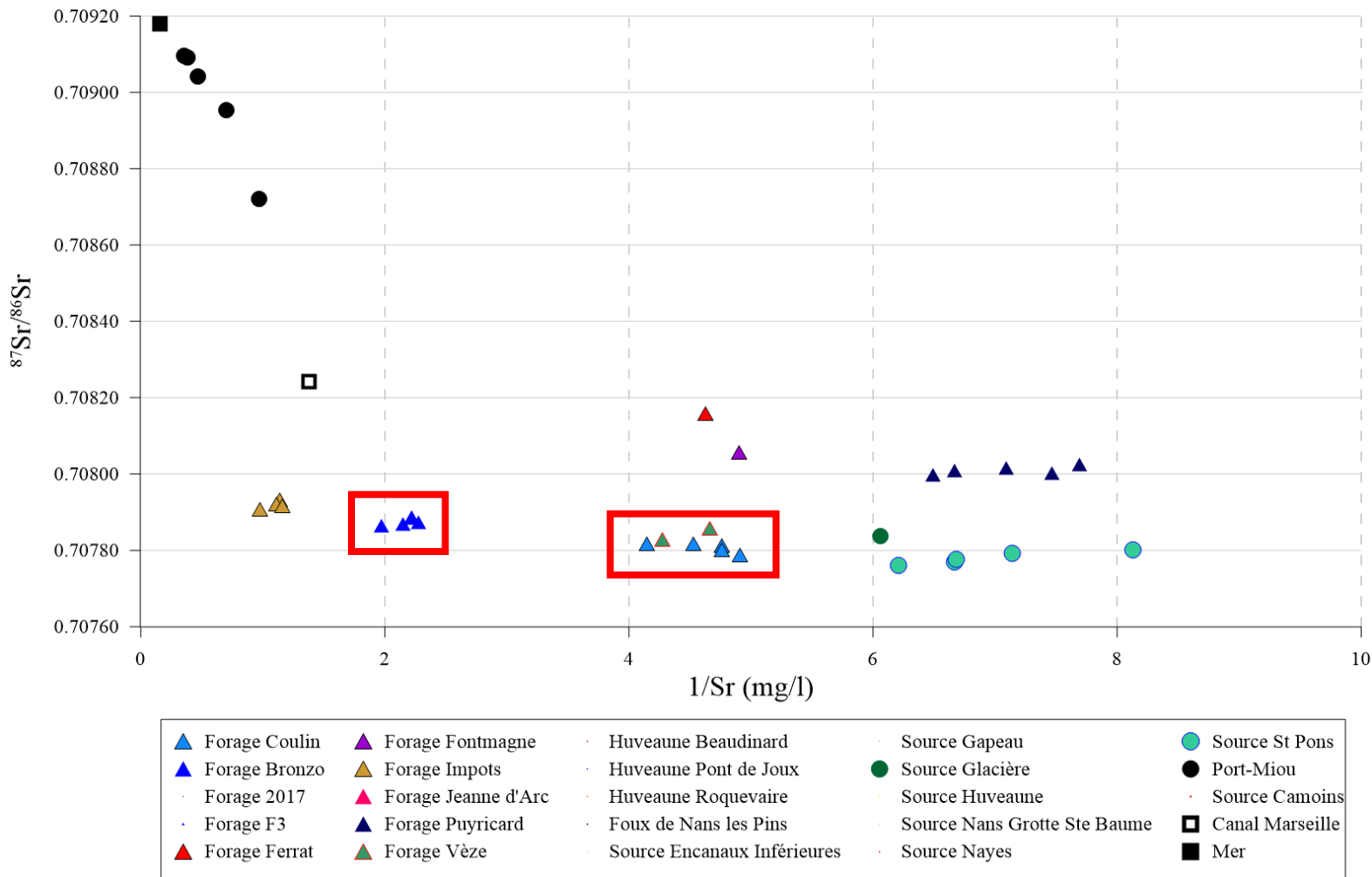




Veizer et al, 1999

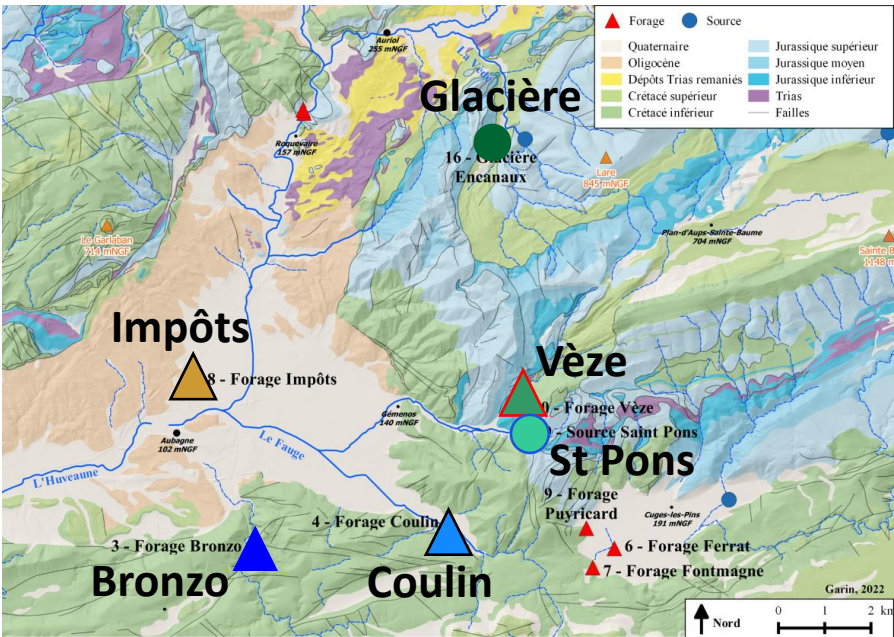
Intérêt du traceur

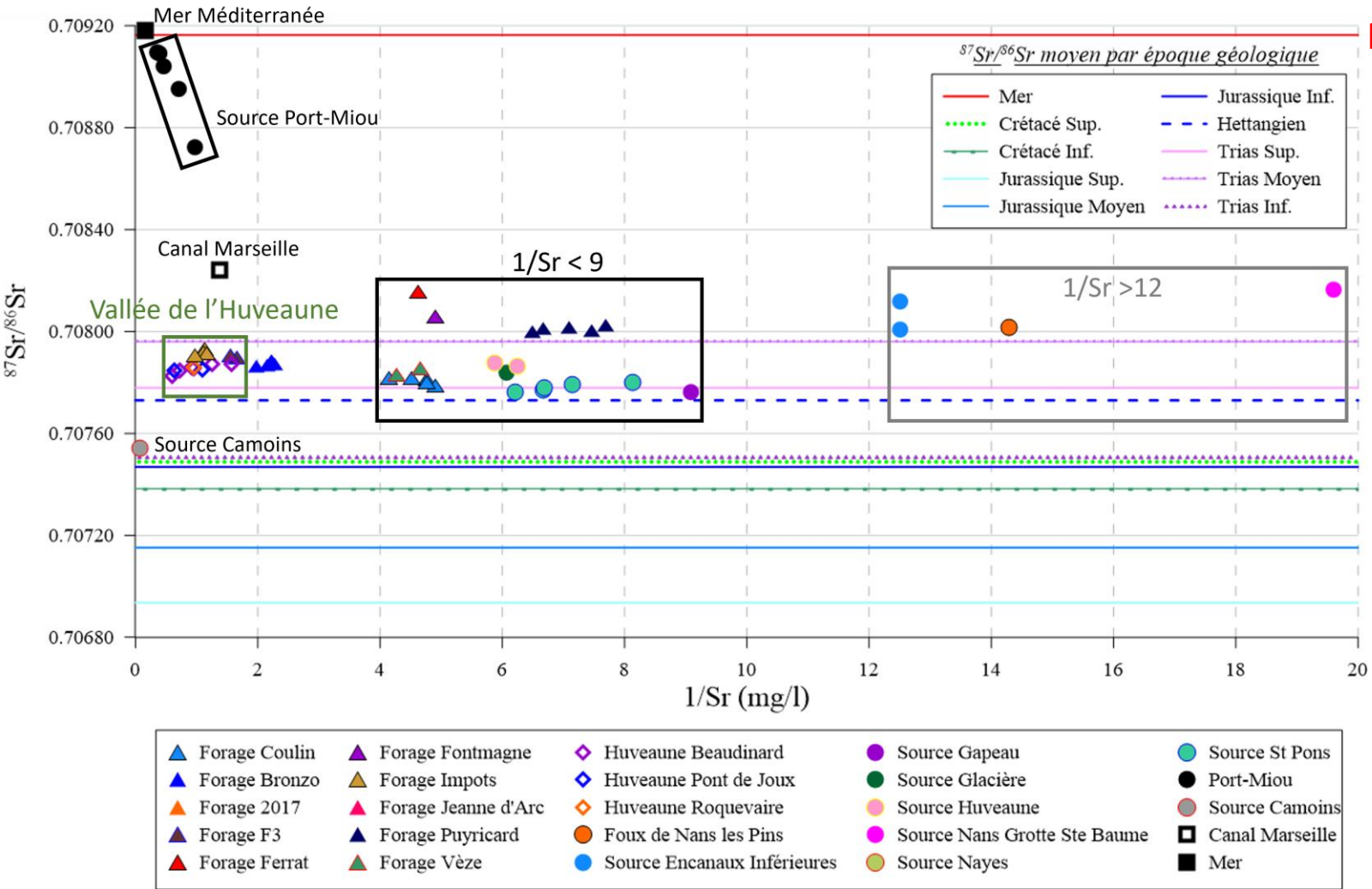
- Le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ permet de dater les roches sédimentaires du Trias au Crétacé
- Pas de fractionnement isotopique
- Traceurs des interactions eau-roche
➔ l'eau se met en équilibre avec la roche
- Marqueur d'influence anthropique (intrants agricoles, ...)
- **Traceur de mélange entre masse d'eau**



La plaine d'Aubagne se décharge-t-elle vers le sud et le massif des Calanques ?

- Mélange entre l'eau de la Sainte-Baume et l'eau de la plaine d'Aubagne





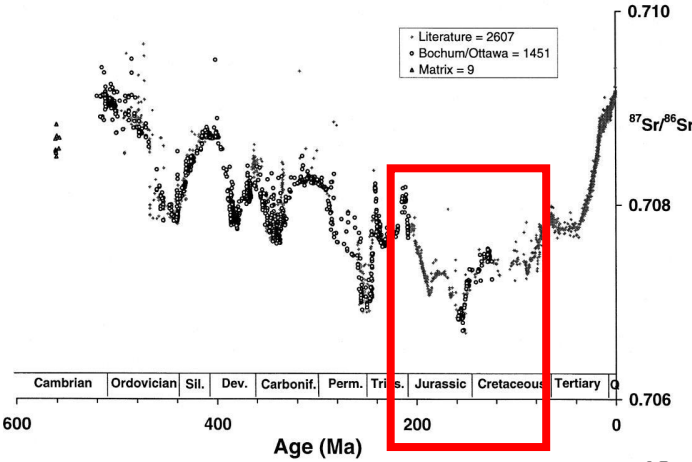
Mer

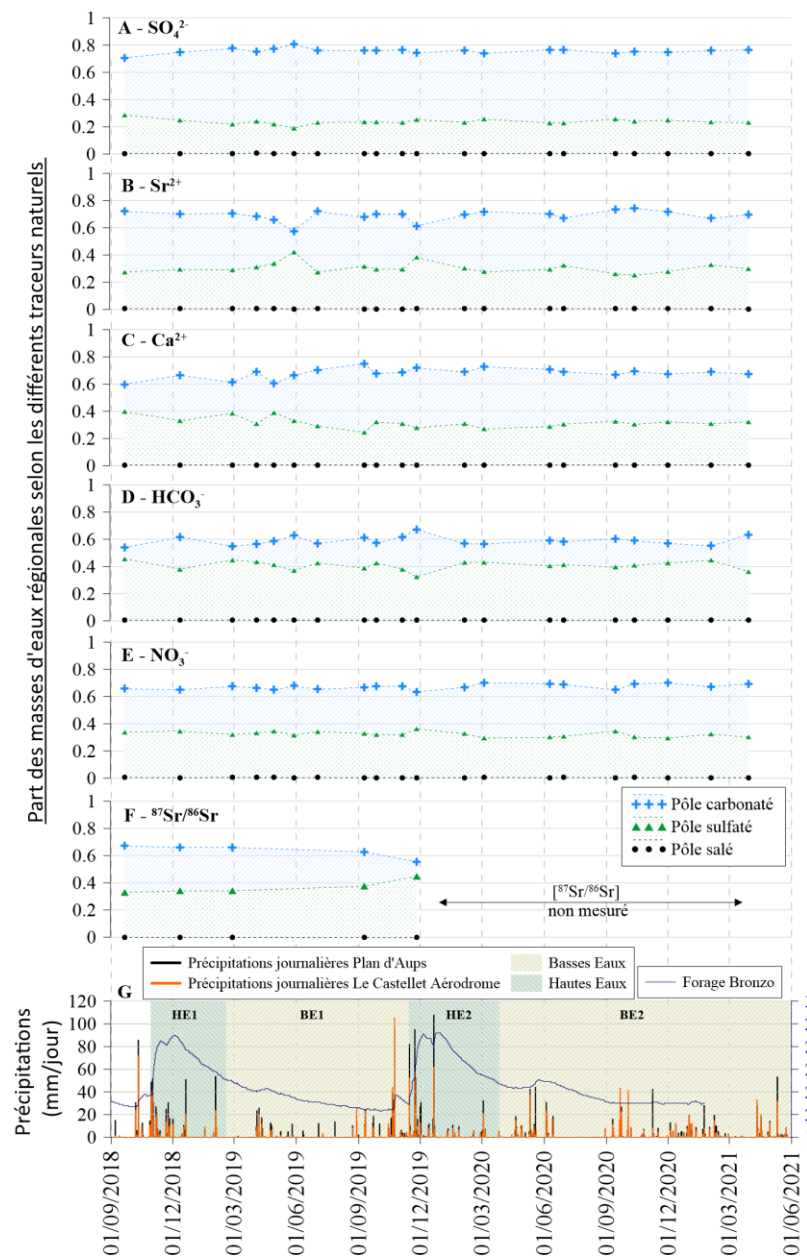
Est-ce que le $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de l'eau est égale à celui de la roche ?

- Anomalie du signal isotopique de l'eau par rapport aux réservoirs crétacé et jurassique

Trias

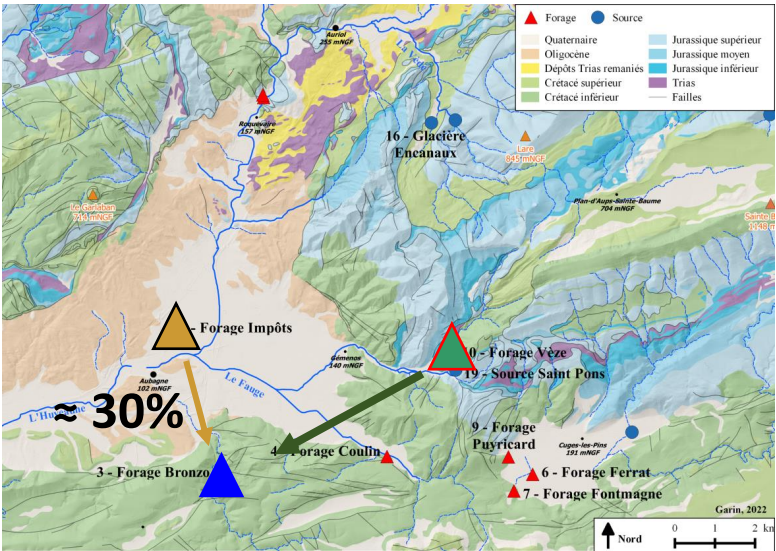
Jurassique et Crétacé

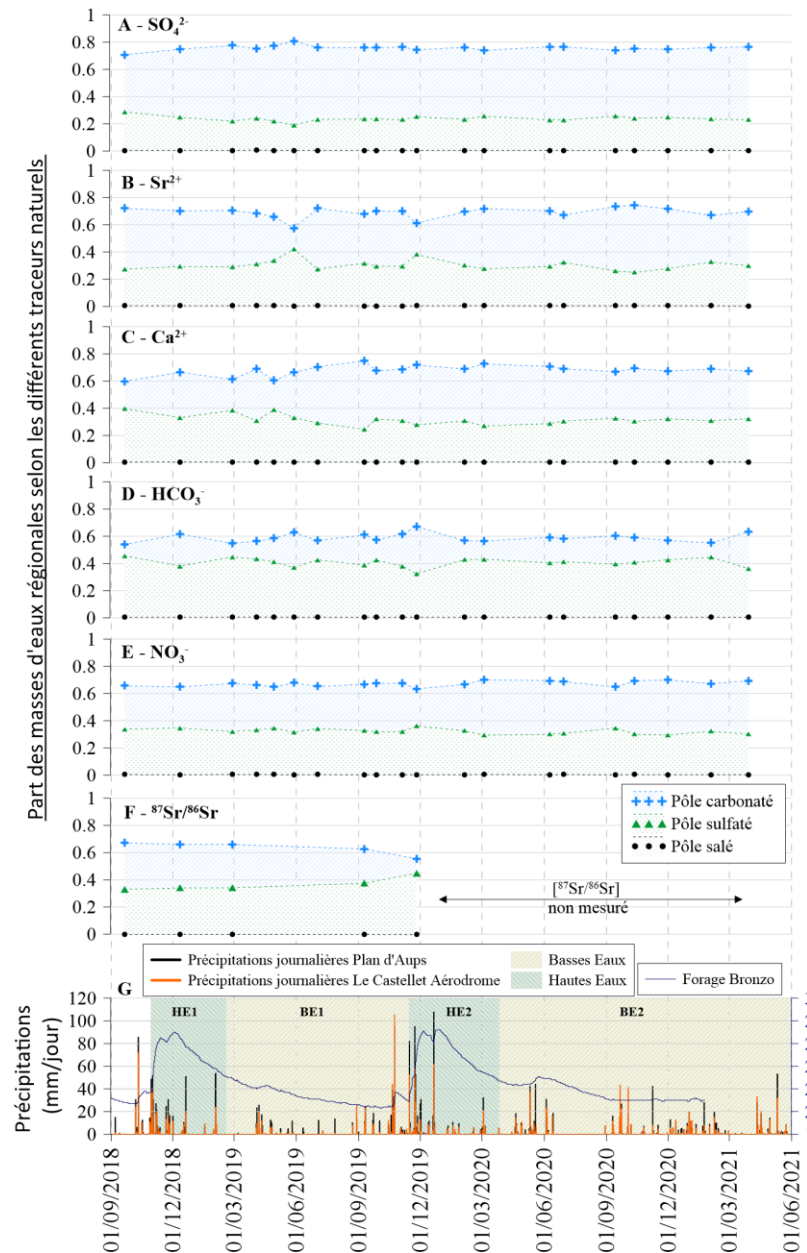




Bronzo

- Mélange à trois pôles
- Influence pôle salin < 0,5%
- Peu de variabilité associée aux conditions hydrologiques

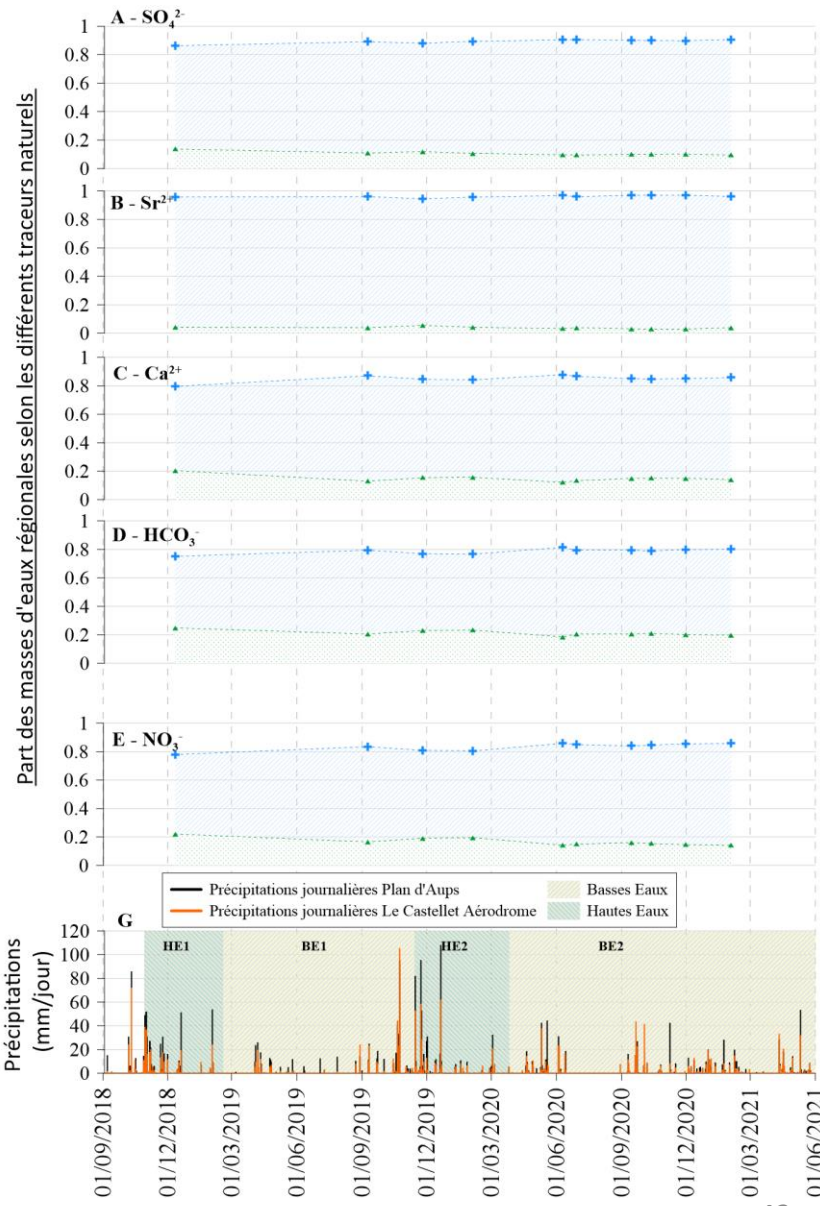
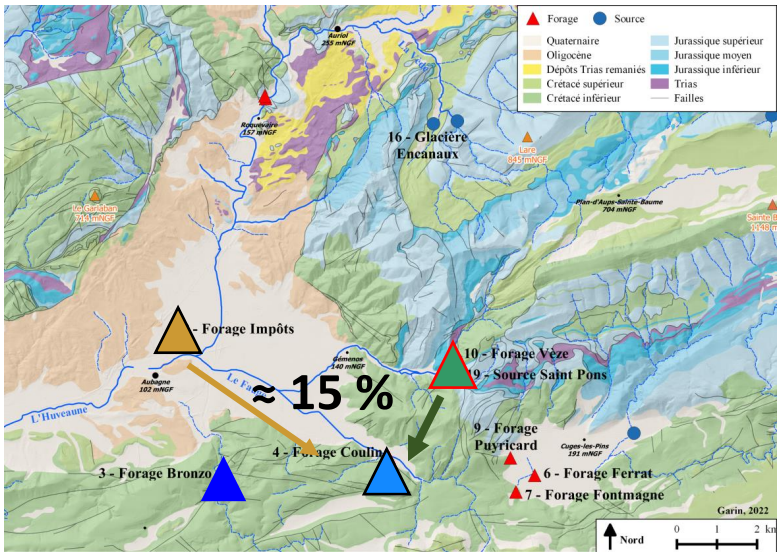




Bronzo

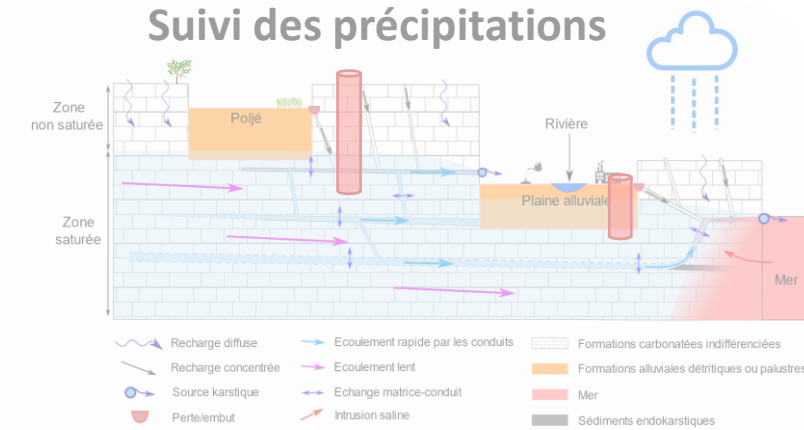
Coulin

- Mélange à deux pôles
- Peu de variabilité associée aux conditions hydrologiques

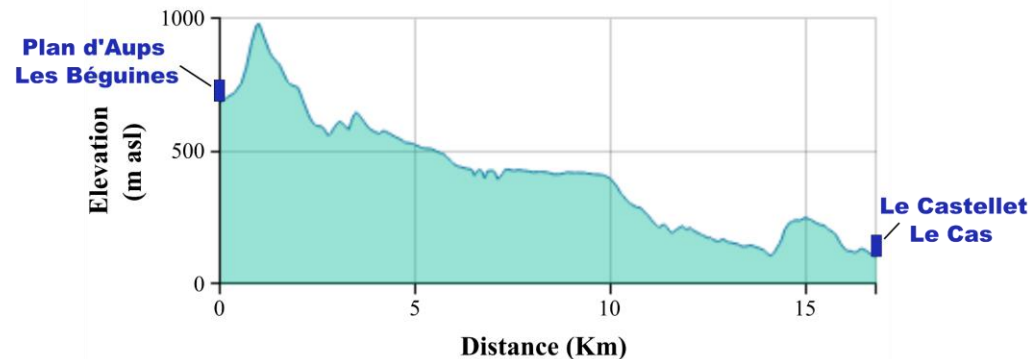
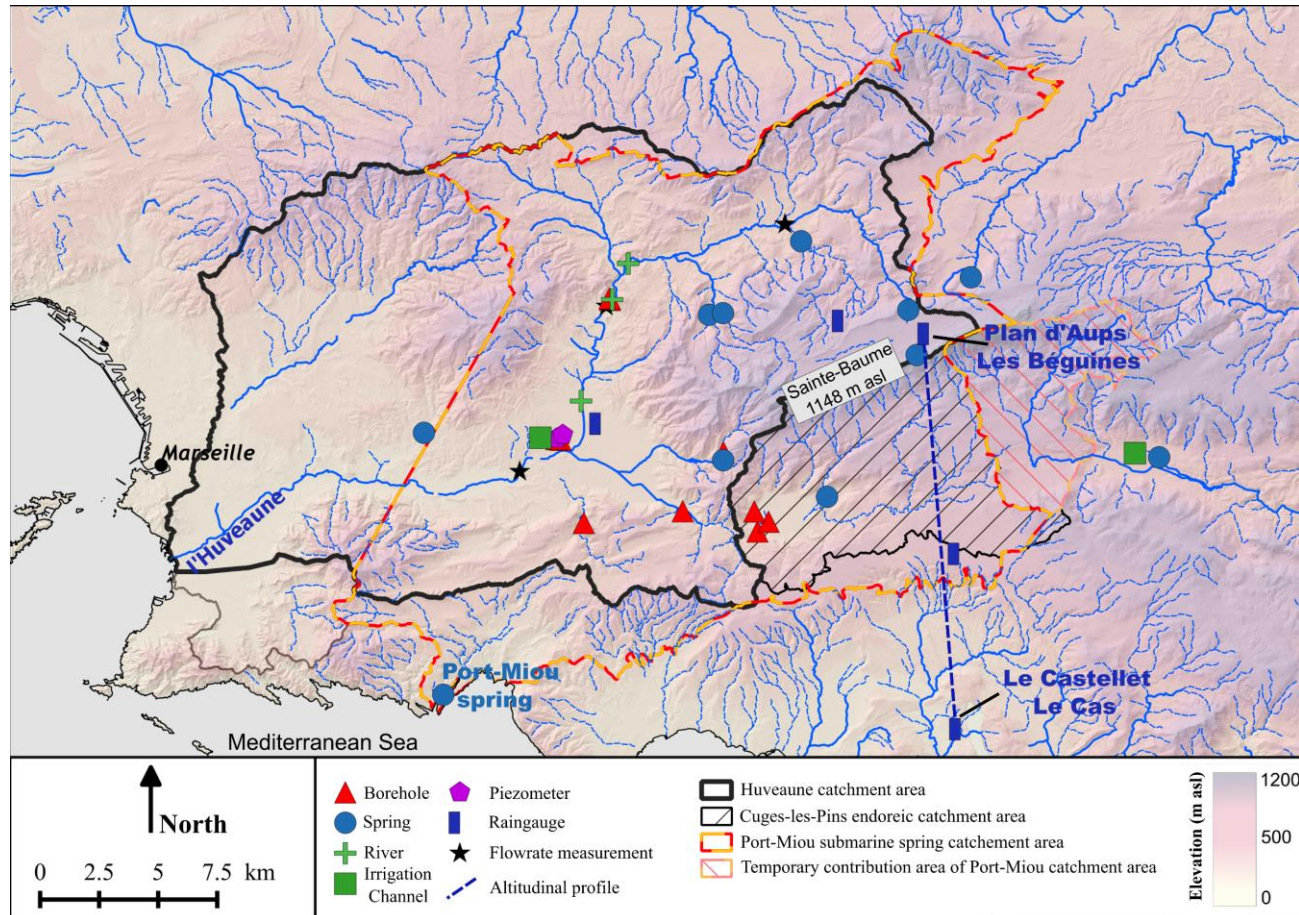


Quel est le signal isotopique de la recharge ?

Couplage de modèle d'infiltration avec les isotopes stables de l'eau ($d^{18}O$, d^2H)

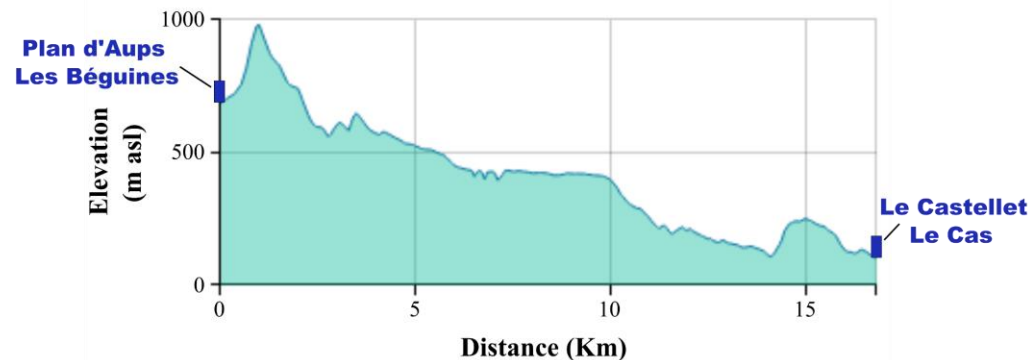
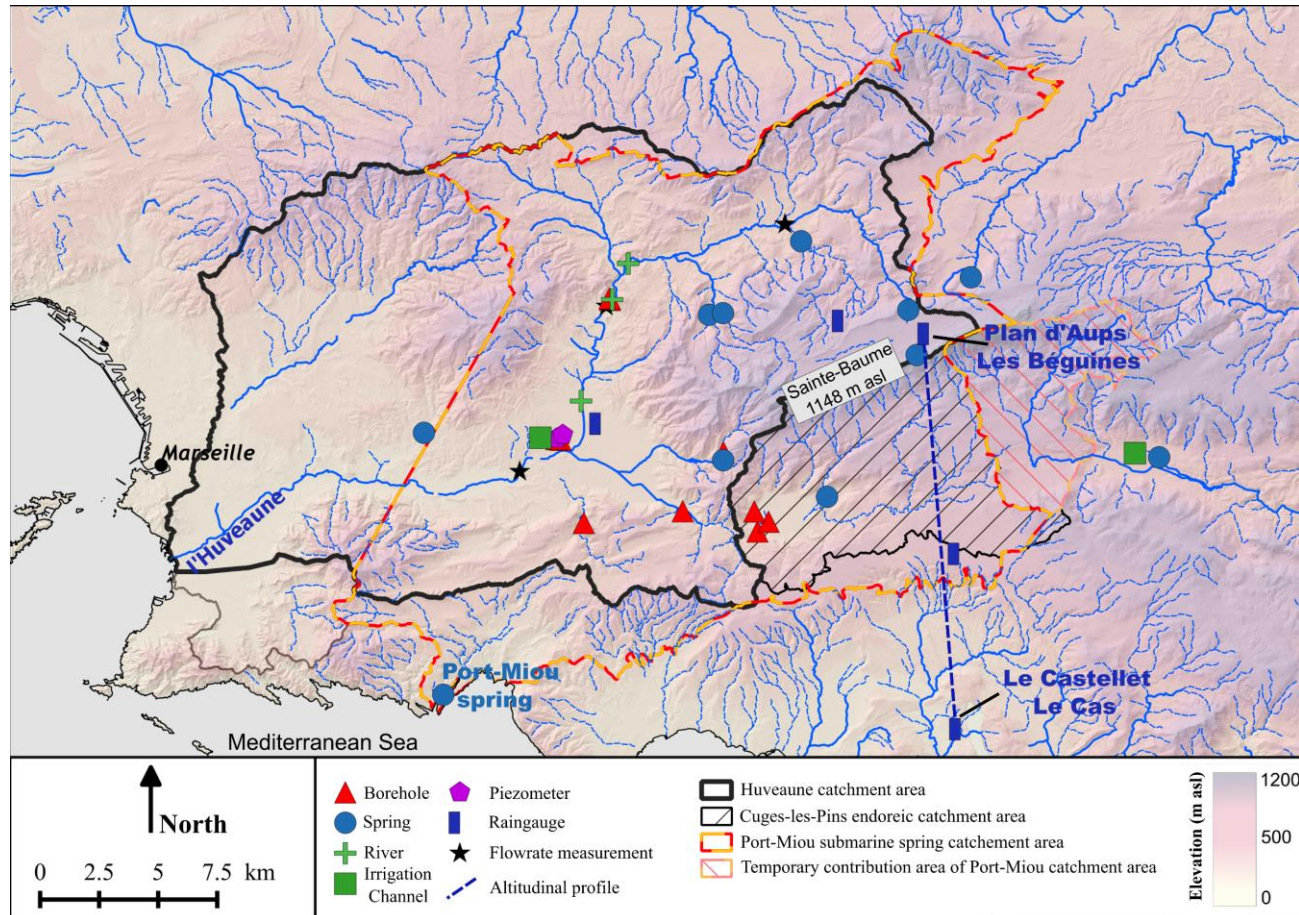


Quel est le signal isotopique de la recharge ?



Suivi des précipitations

- Cumul de précipitations et ETP journalières fournit par Météo-France
- Deux stations de collecte de la pluie
- Stations représentatives de l'altitude de la zone d'étude
 - Plan d'Aups - 682 mNGF
 - Castellet - 103 mNGF

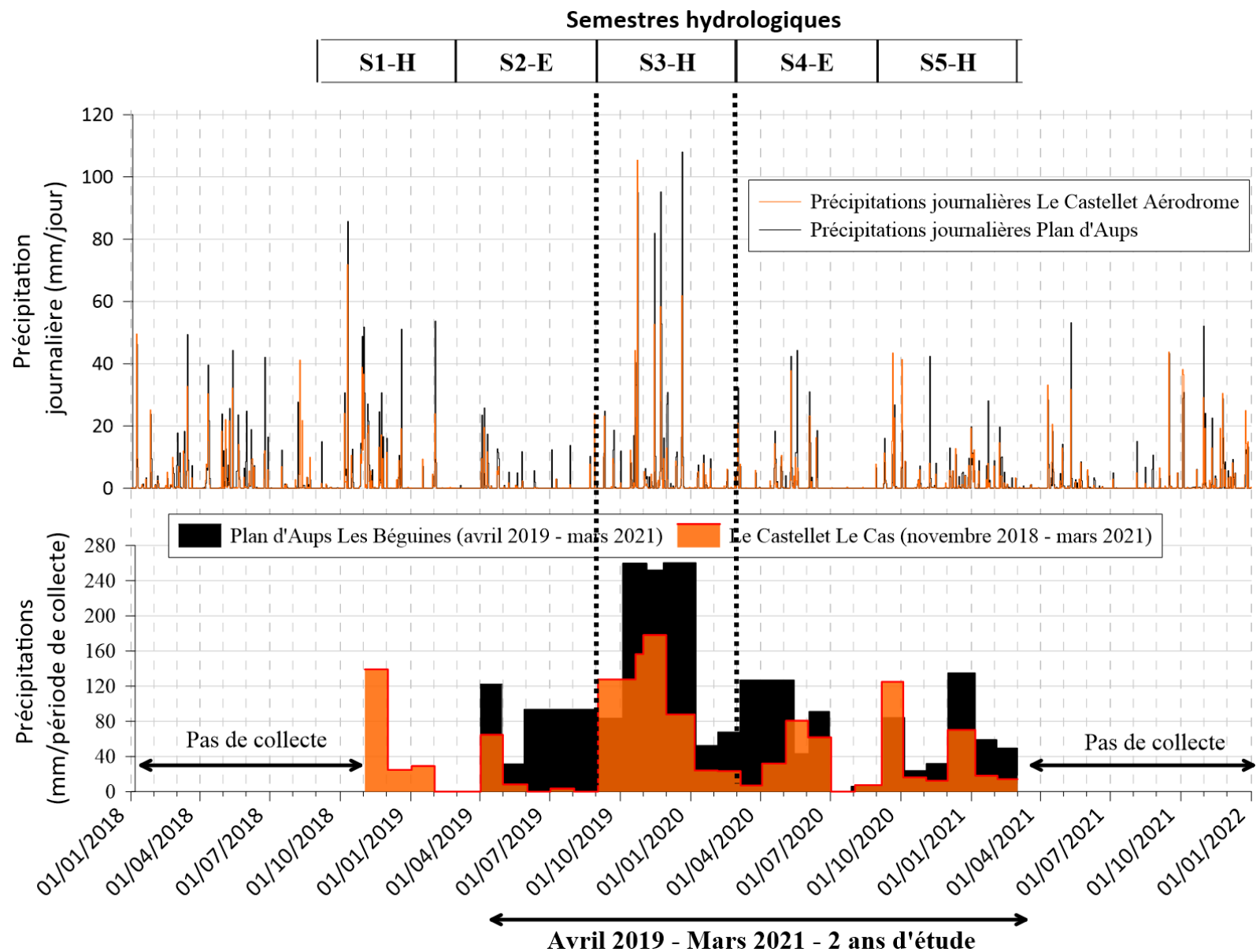


Suivi des précipitations

- Cumul de précipitations et ETP journalières fournit par Météo-France
- Deux stations de collecte de la pluie
- Stations représentatives de l'altitude de la zone d'étude
 - Plan d'Aups - 682 mNGF
 - Castellet - 103 mNGF

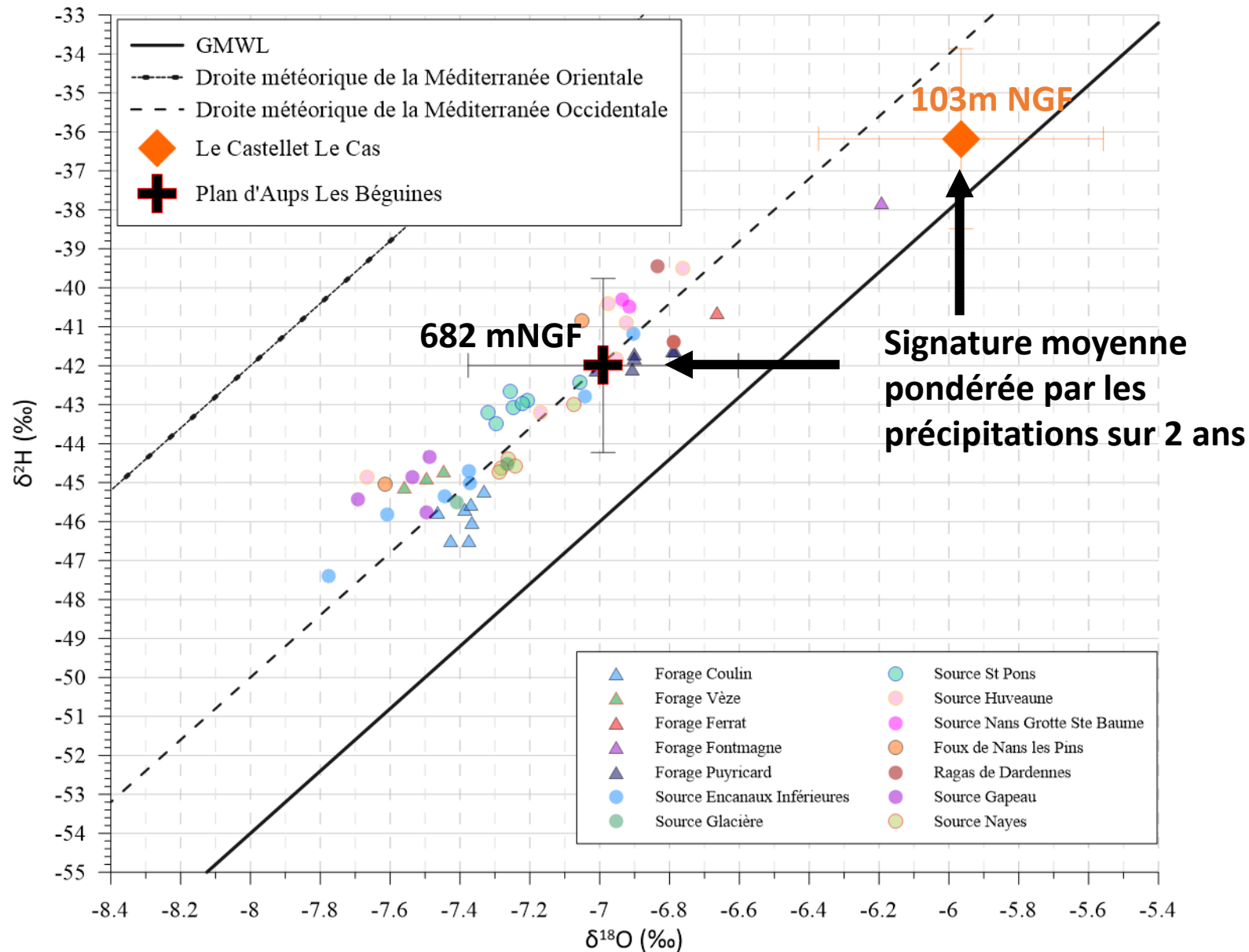
Collecte de la pluie

- Cumul mensuel pour analyse des isotopes stables de l'eau
- Pas d'évaporation lors de la collecte

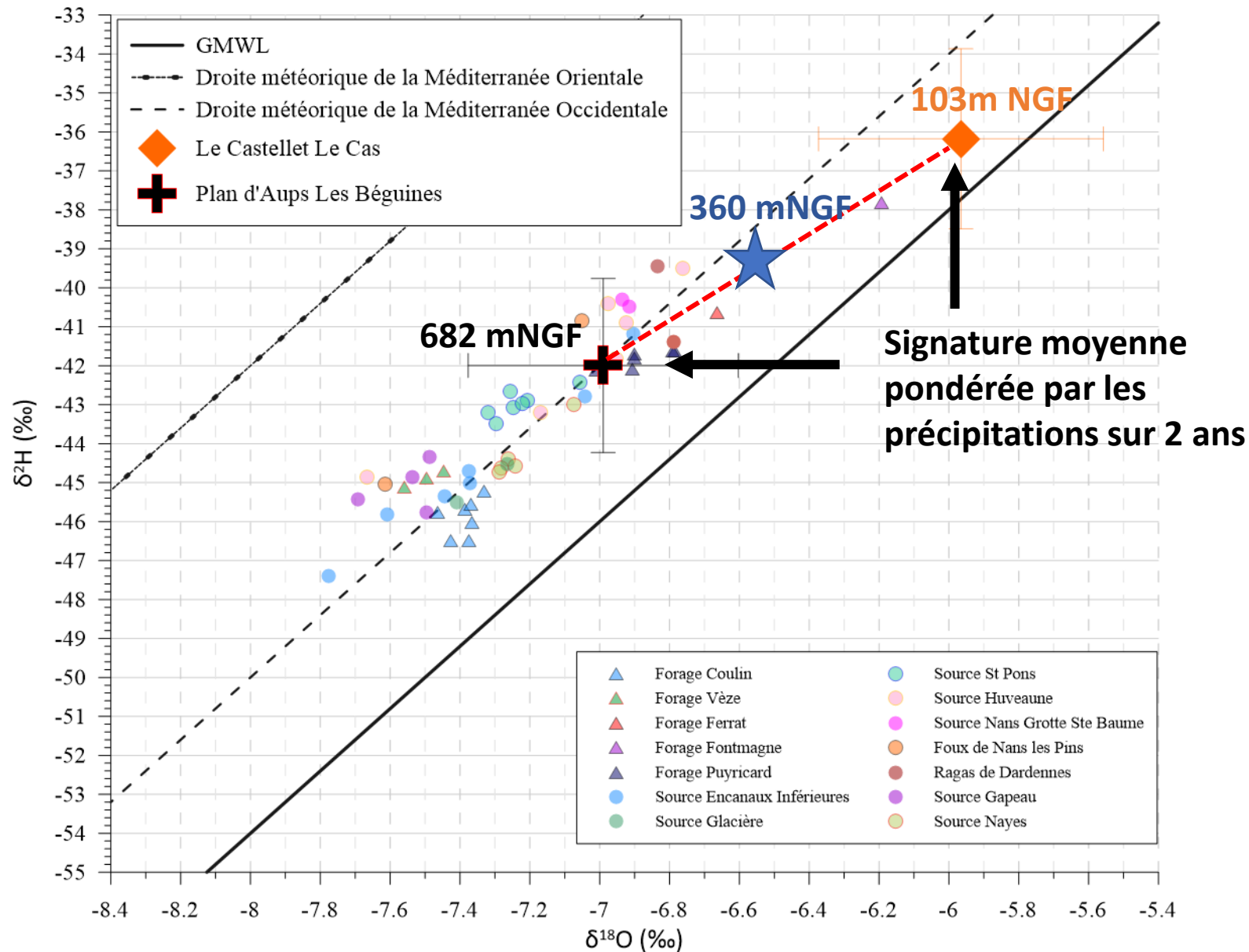


Variabilité spatiale et temporelle

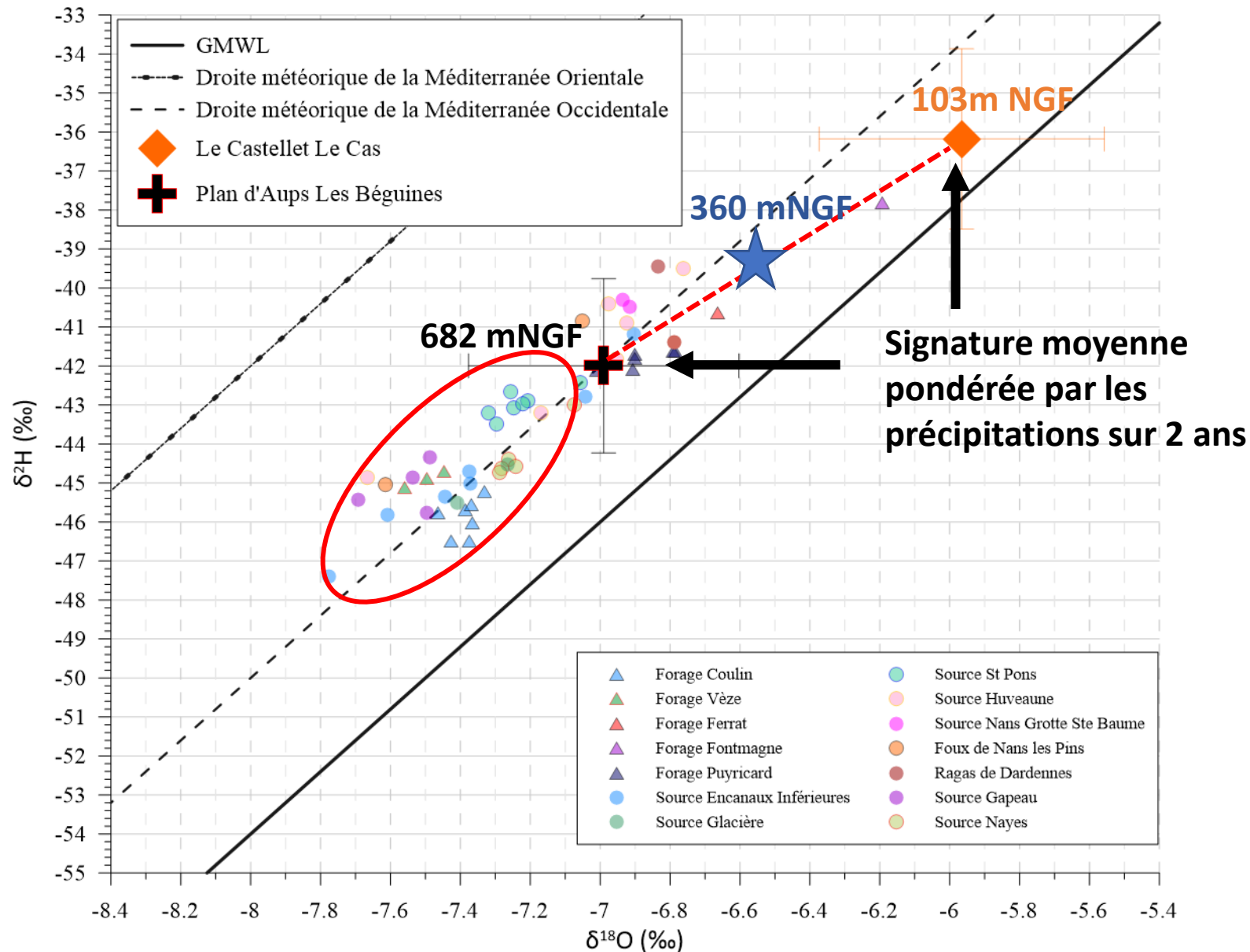
- **Précipitations majoritaires en automne/hiver**
- Castellet : Semestre S3-H $\approx 45\%$ du cumul sur 2 ans
- Plan d'Aups : Semestre S3-H $\approx 51\%$ du cumul sur 2 ans
- **Variabilité spatiale**
- Castellet : cumul 2ans : 1311 mm
- Plan d'Aups : cumul 2ans : 1895 mm



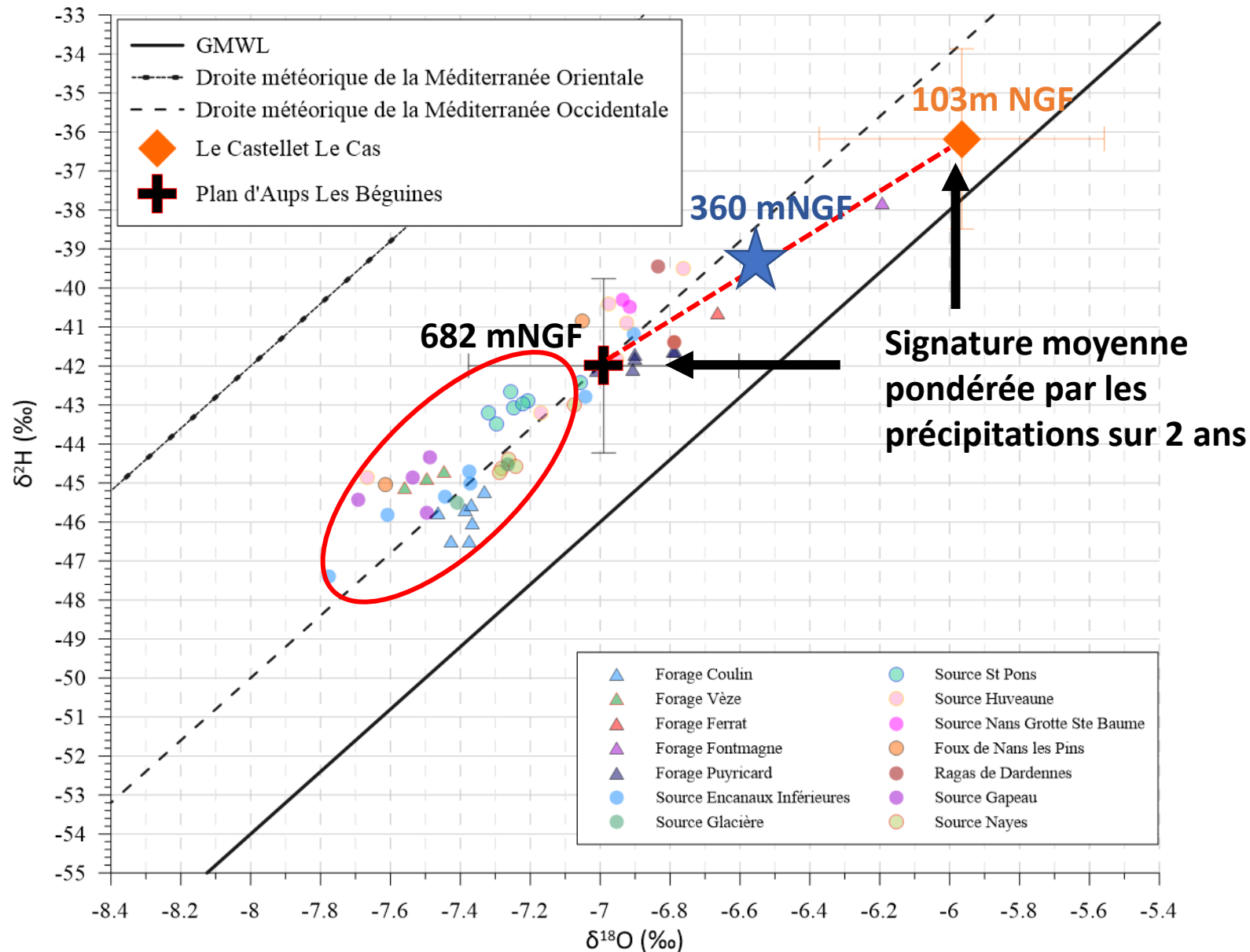
- Signature en isotopes stables de la pluie → moyenne pondérée par les précipitations



- Signature en isotopes stables de la pluie → moyenne pondérée par les précipitations
- Altitude moyenne du BV de l'Huveaune en amont d'Aubagne – 360 mNGF

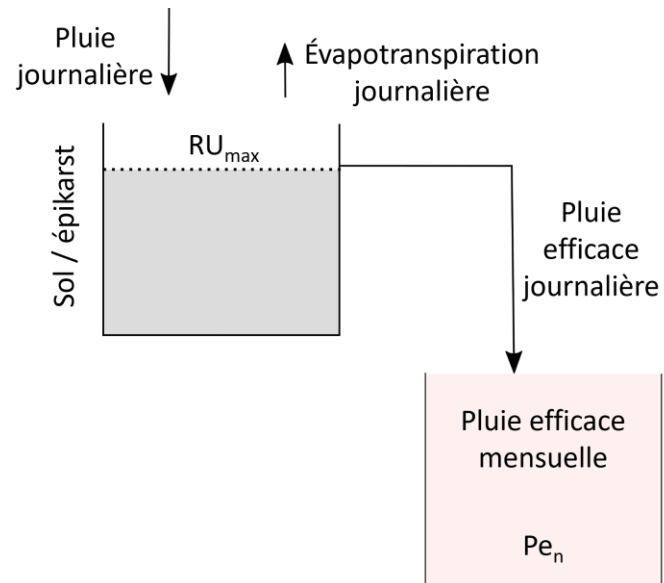


- Signature en isotopes stables de la pluie → moyenne pondérée par les précipitations
- Altitude moyenne du BV de l'Huveaune en amont d'Aubagne – 360 mNGF
- Eaux souterraines appauvries par rapport à la valeur moyenne pondérée par les précipitations
- Pas d'évaporation des eaux souterraines



- Signature en isotopes stables de la pluie → moyenne pondérée par les précipitations
- Altitude moyenne du BV de l'Huveaune en amont d'Aubagne – 360 mNGF
- Eaux souterraines appauvries par rapport à la valeur moyenne pondérée par les précipitations
- Pas d'évaporation des eaux souterraines

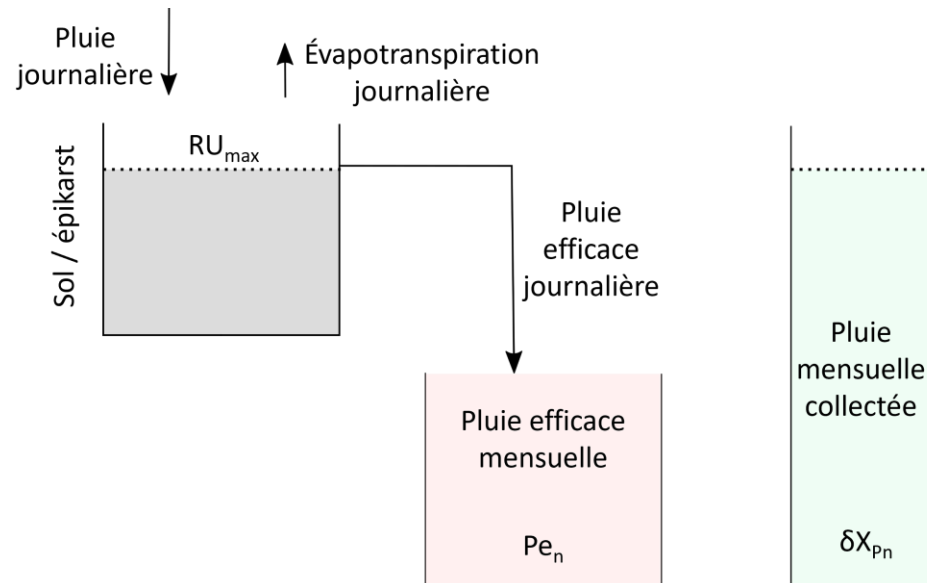
➔ **Le signal de la pluie est-il celui de la recharge ?**



- RU_{max} : Réserve utile maximale
- n : nombre de mois de collecte
- Pe_n : Pluie efficace mensuelle
- δX_{Pe_n} : Composition isotopique de la pluie mensuelle collectée
- Δ : Composition isotopique pondérée par les pluies efficaces calculées sur la période N
- N : longueur de la période de pondération

Calcul de la pluie efficace

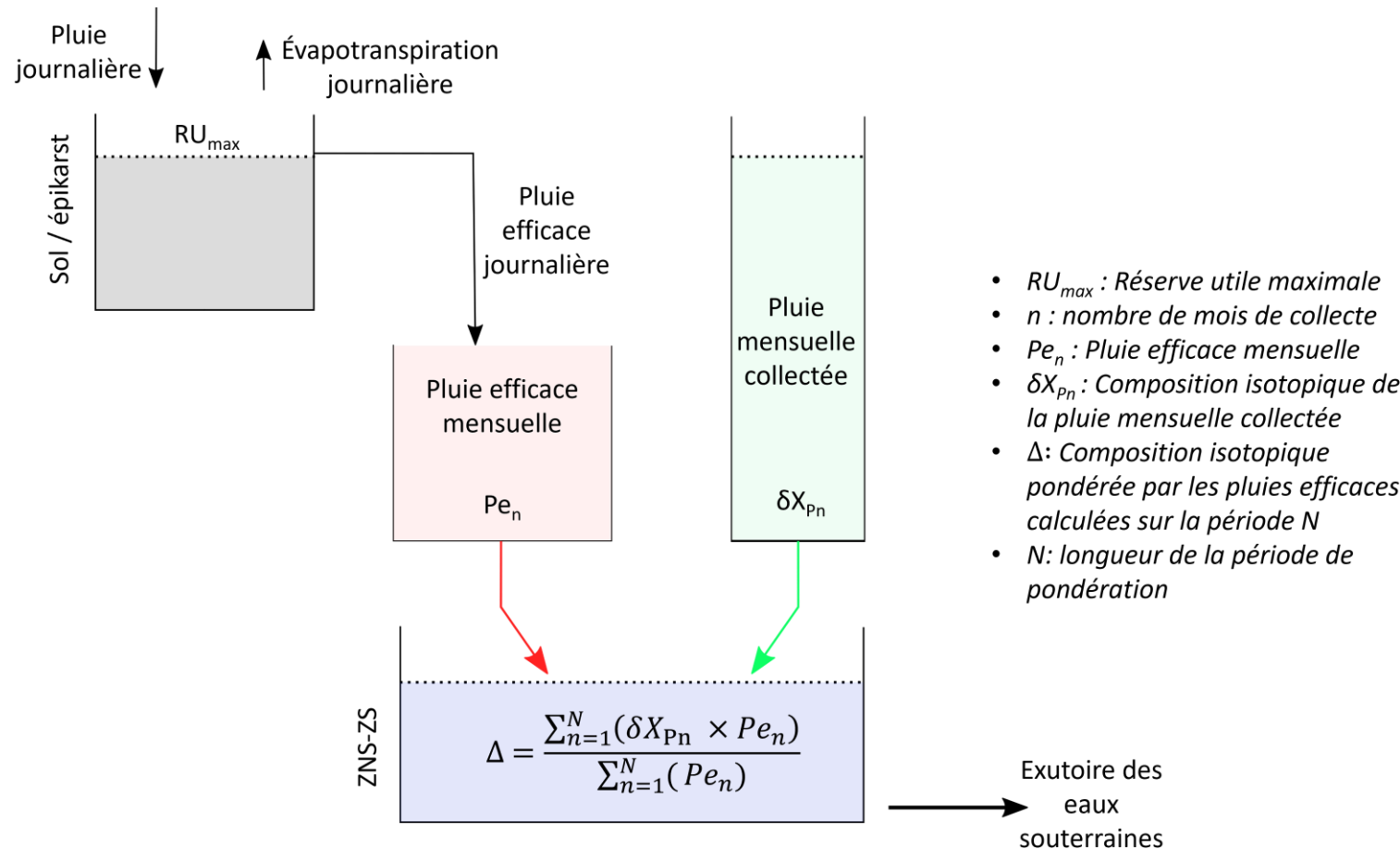
- Modèle de Thornthwaite
- Calcul pluie efficace journalière
- 5 valeurs de RU_{max} testées: 20, 40, 60, 80 et 100 mm
- Cumul mensuel pour connaître la pluie efficace mensuelle



- RU_{max} : Réserve utile maximale
- n : nombre de mois de collecte
- Pe_n : Pluie efficace mensuelle
- δX_{p_n} : Composition isotopique de la pluie mensuelle collectée
- Δ : Composition isotopique pondérée par les pluies efficaces calculées sur la période N
- N : longueur de la période de pondération

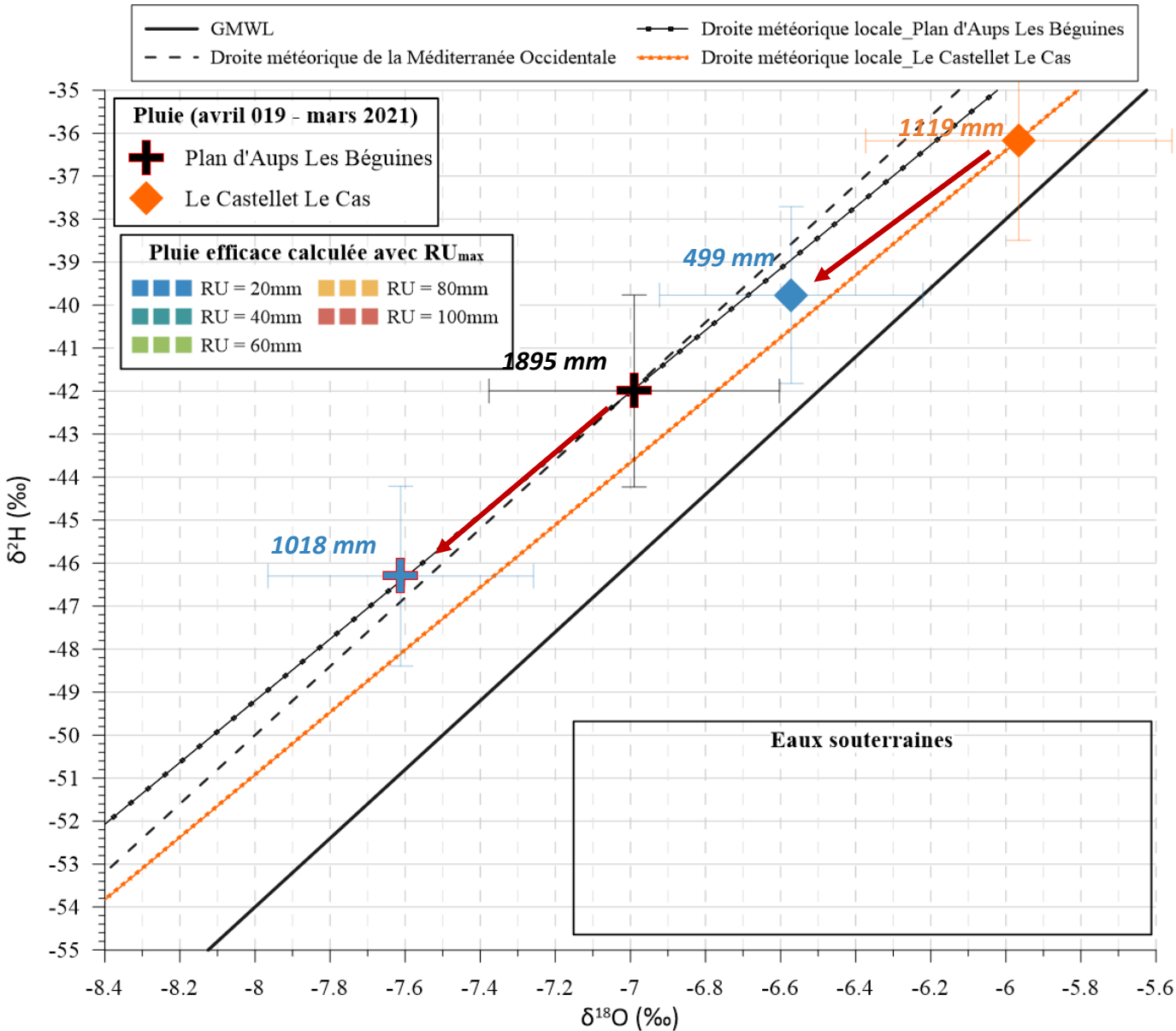
Calcul de la pluie efficace

- Modèle de Thornthwaite
- Calcul pluie efficace journalière
- 5 valeurs de RU_{max} testées: 20, 40, 60, 80 et 100 mm
- Cumul mensuel pour connaître la pluie efficace mensuelle
- Composition isotopique de la pluie – collecte mensuelle



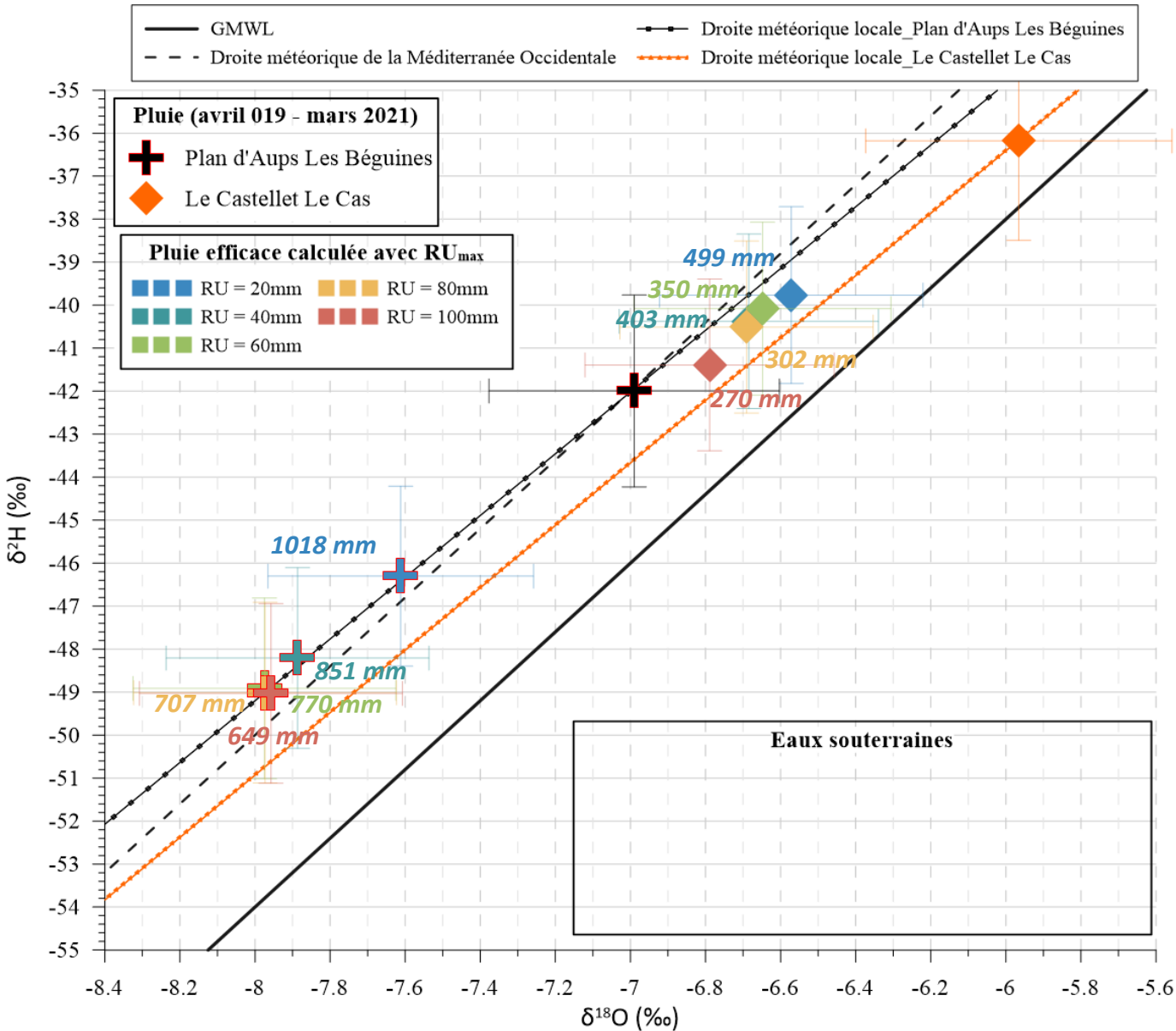
Calcul de la pluie efficace

- Modèle de Thornthwaite
- Calcul pluie efficace journalière
- 5 valeurs de RU_{max} testées: 20, 40, 60, 80 et 100 mm
- Cumul mensuel pour connaître la pluie efficace mensuelle
- Composition isotopique de la pluie – collecte mensuelle
- **Bilan isotopique sur 2 ans**
 ➔ pondération de la composition isotopique de la pluie par la pluie efficace



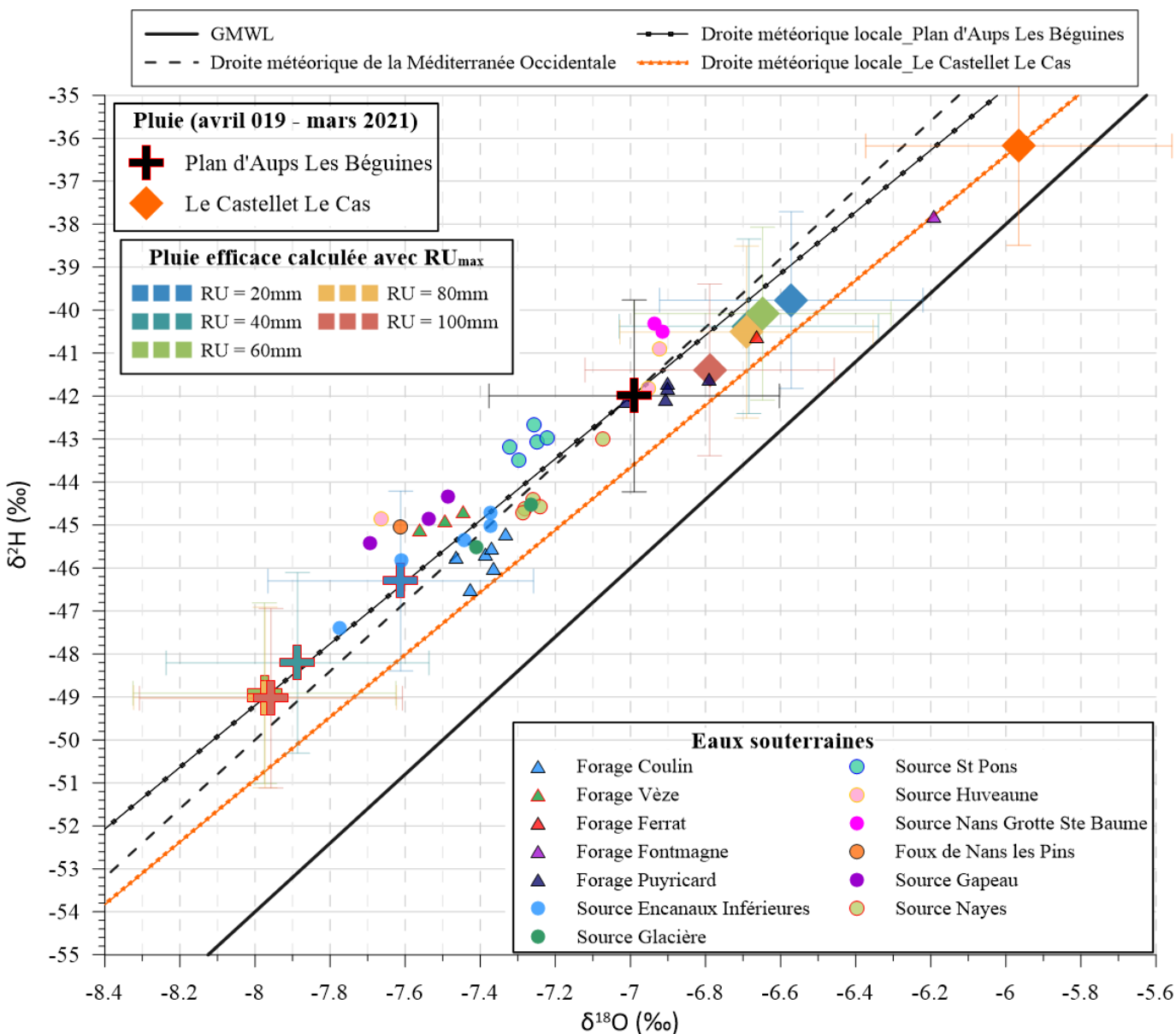
A l'échelle de la période d'étude de 2 ans – deux stations de collecte des précipitations

- $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ selon la RU_{max}
- $\text{RU}_{\text{max}} = 20\text{mm}$
 ➔ Pluie efficace divisé par 2
 ➔ Appauvrissement fort de la pluie efficace par rapport à la pluie



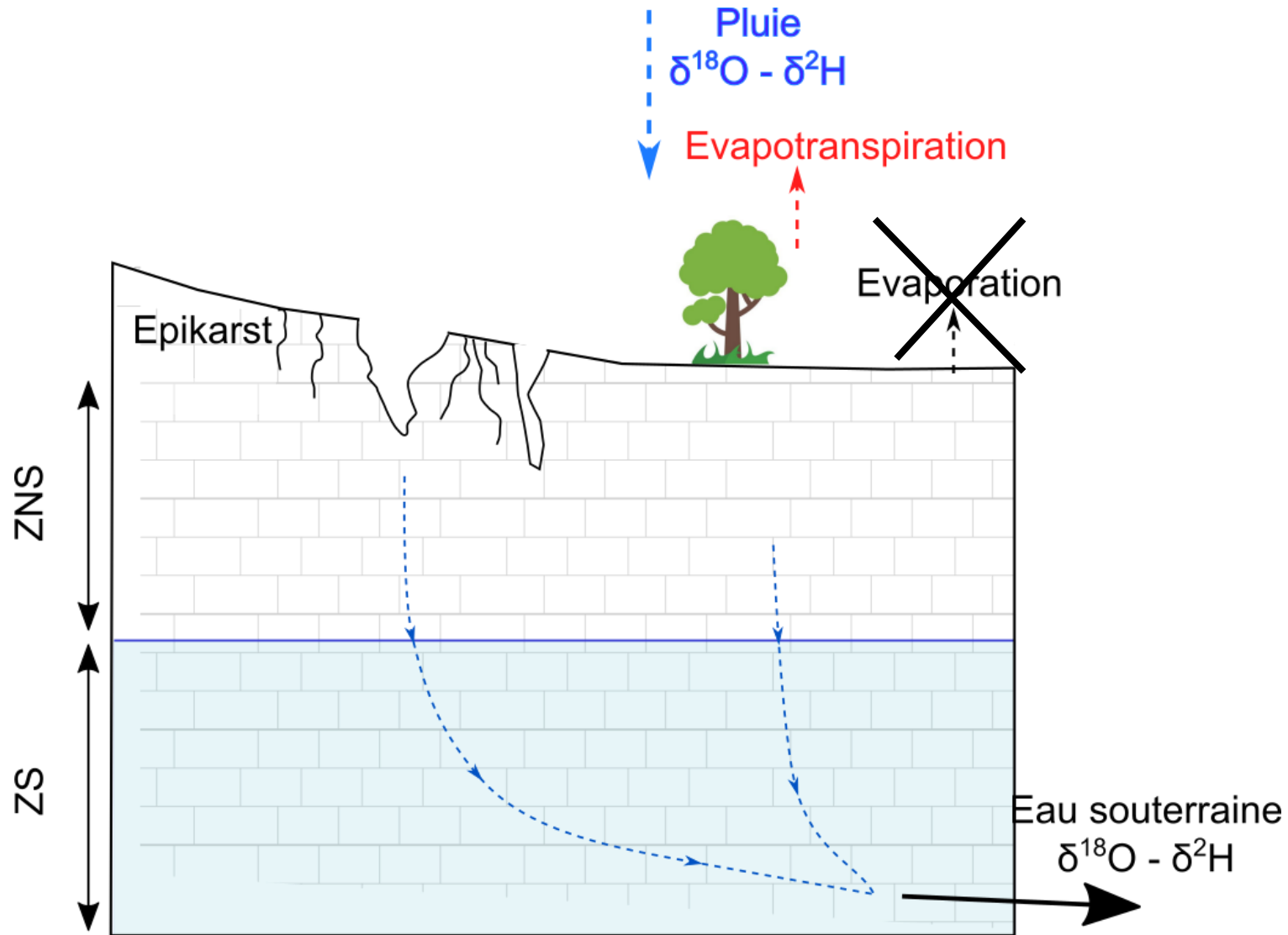
A l'échelle de la période d'étude de 2 ans – deux stations de collecte des précipitations

- $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ selon la RU_{max}
- $\text{RU}_{\text{max}} = 20\text{mm}$
- Pluie efficace divisé par 2
- Appauvrissement fort de la pluie efficace par rapport à la pluie

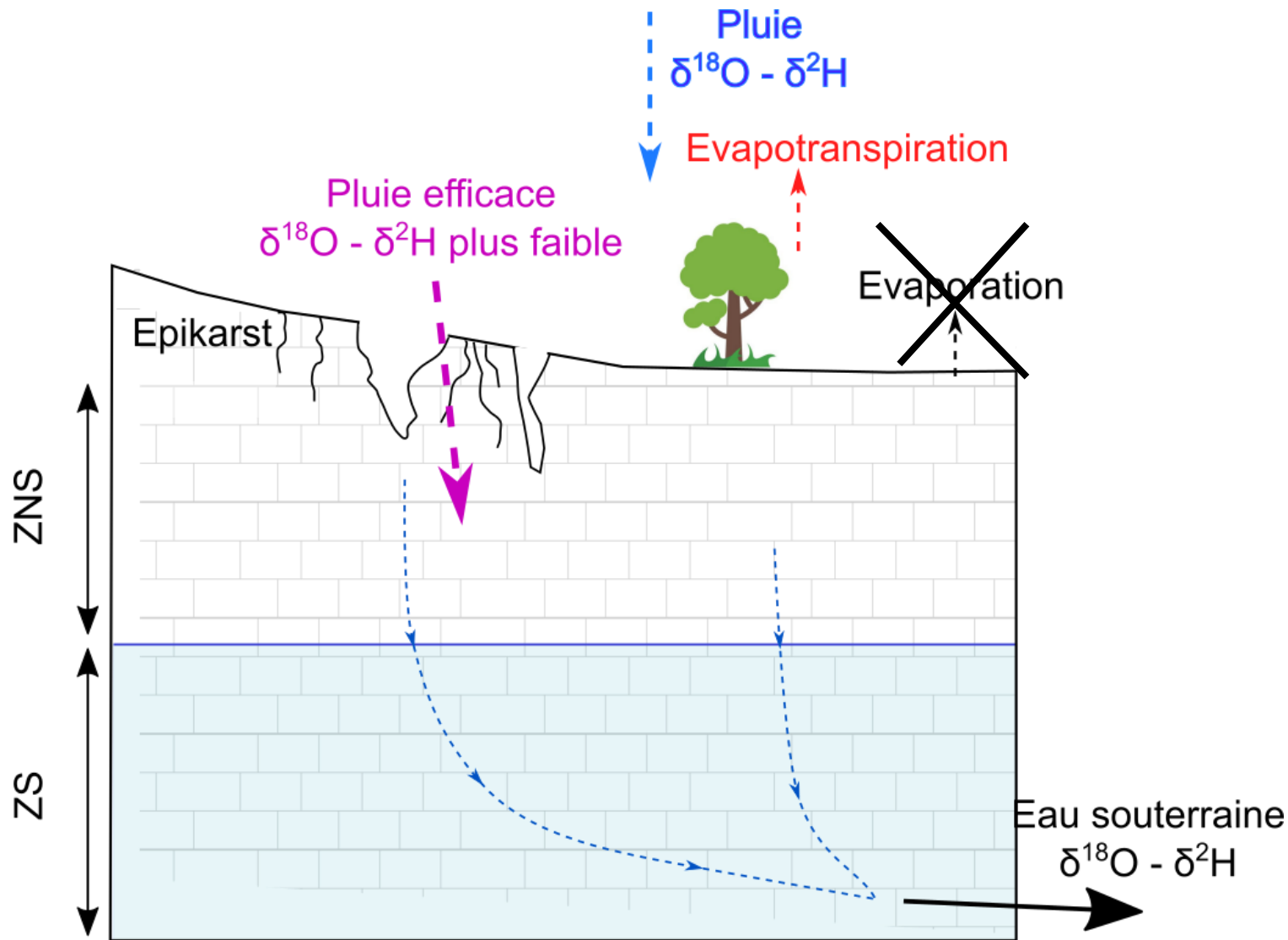


A l'échelle de la période d'étude de 2 ans – deux stations de collecte des précipitations

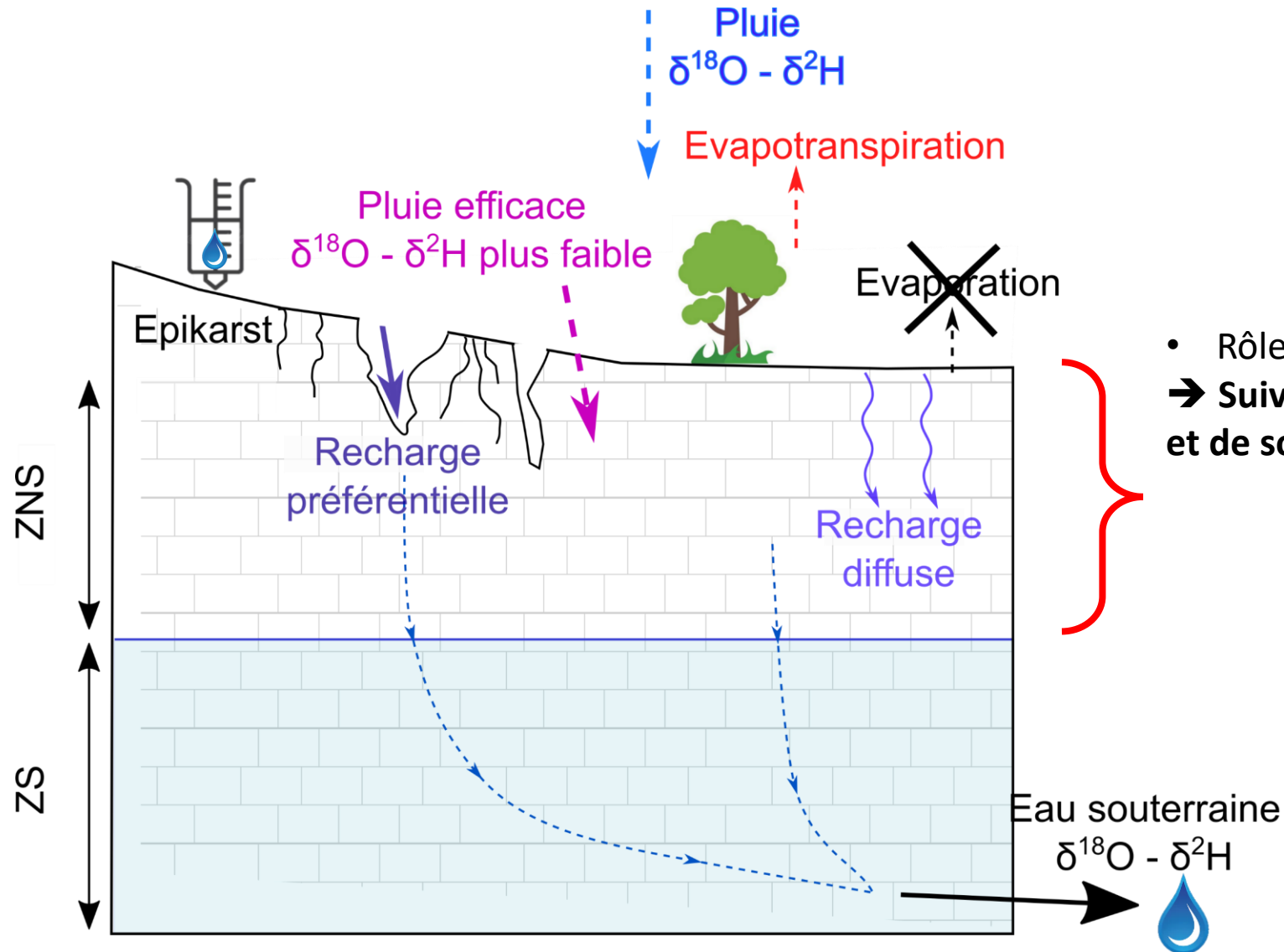
- $d^{18}O$ vs d^2H selon la RU_{max}
- $RU_{max} = 20mm$
 ➔ Pluie efficace divisé par 2
 ➔ Appauvrissement fort de la pluie efficace par rapport à la pluie
- Eaux souterraines dans l'intervalle du signal isotopique de la pluie efficace des deux stations de collecte des pluies



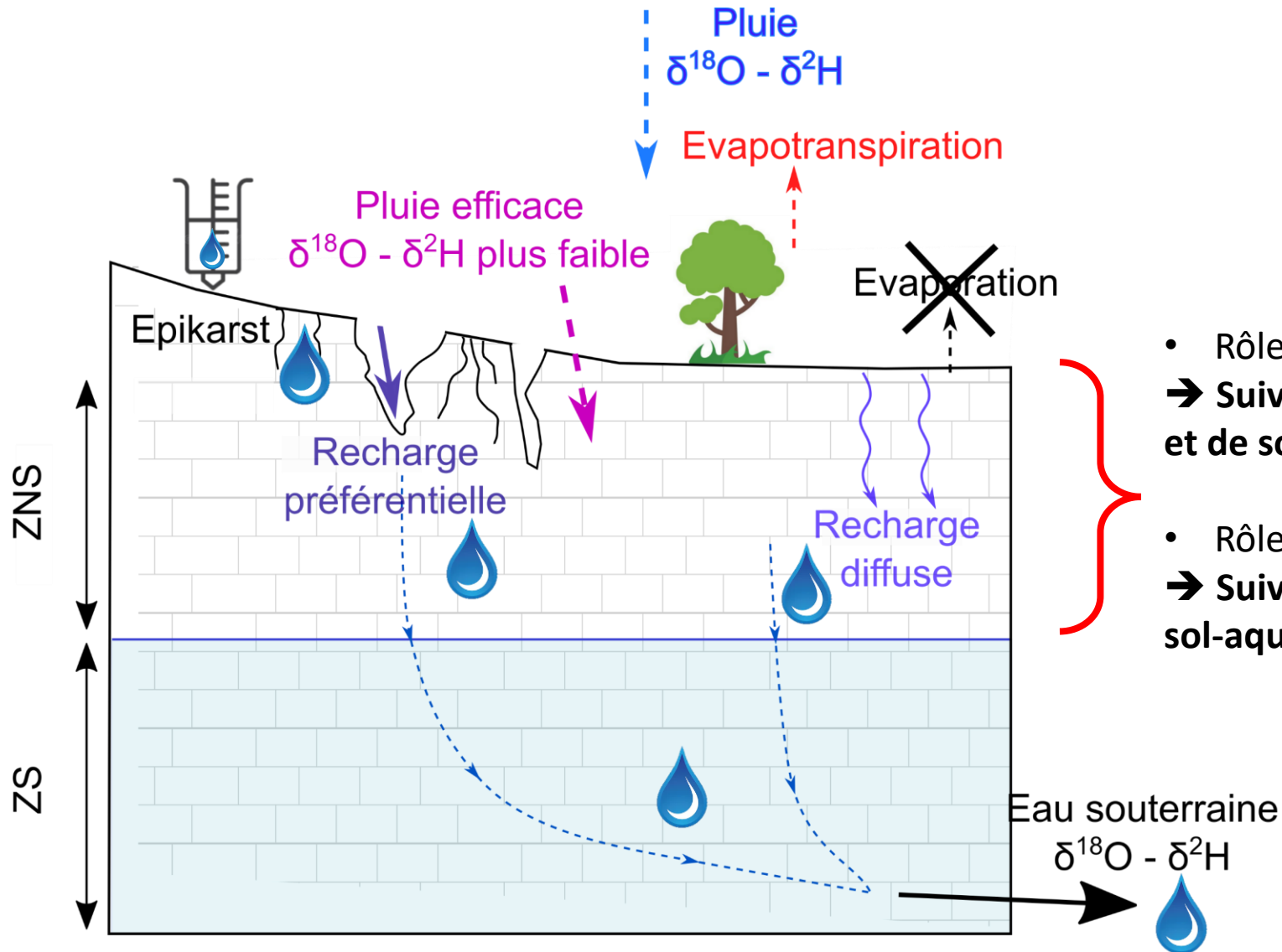
- Le modèle est validé sans prendre en compte des processus de fractionnement dans le sol



- Le modèle est validé sans prendre en compte des processus de fractionnement dans le sol
- $d^{18}\text{O}$ et $d^2\text{H}$ de la pluie efficace sont appauvries par rapport aux précipitations
- $d^{18}\text{O}$ de la pluie efficace sur 2 ans est guidé par le $d^{18}\text{O}$ du semestre S3-H, caractérisé par une composition isotopique appauvrie



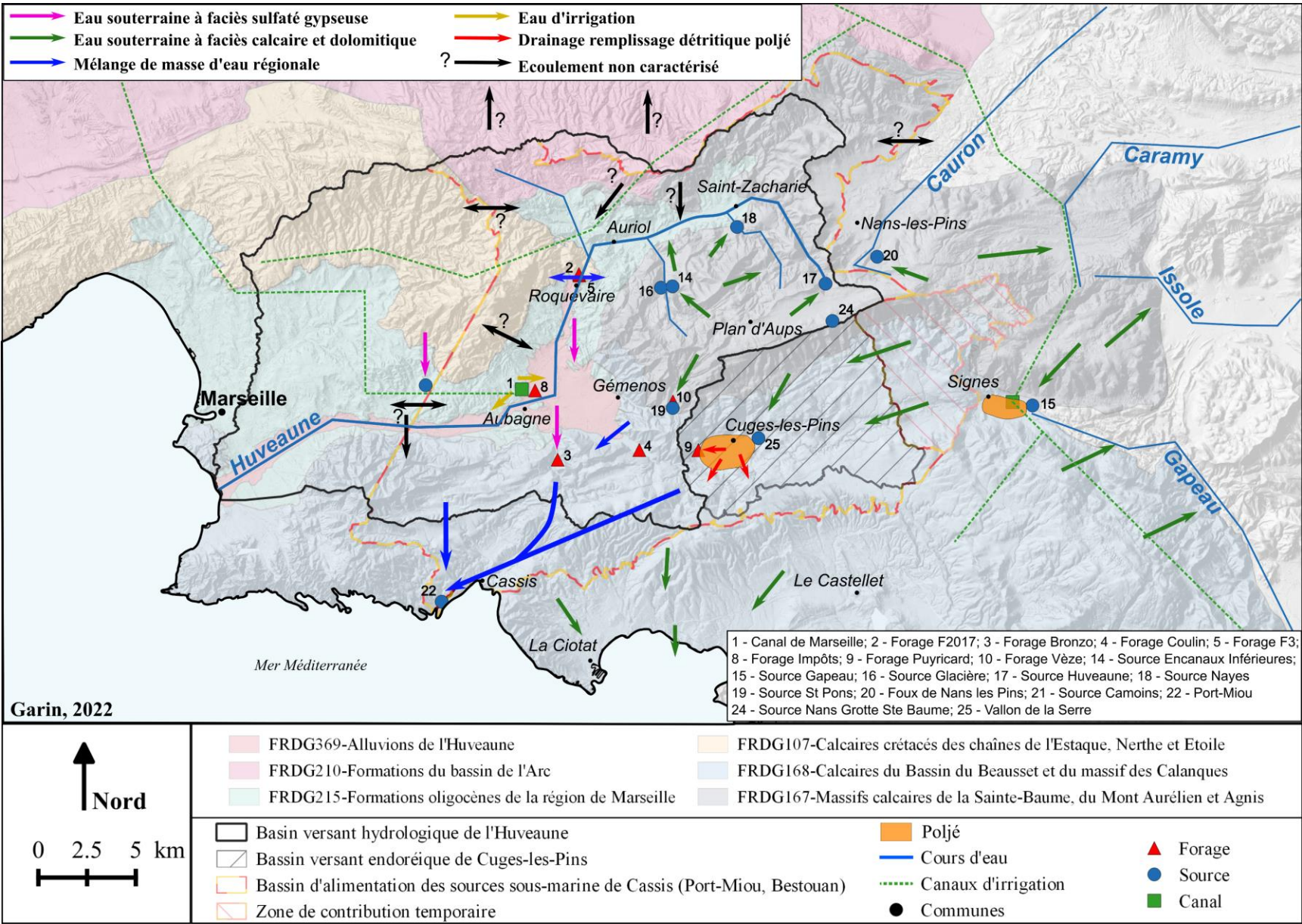
- Rôle de la recharge préférentielle ou diffuse
→ **Suivi journalier à événementielle du signal d'entrée et de sortie**



- Rôle de la recharge préférentielle ou diffuse
→ **Suivi journalier à événementielle du signal d'entrée et de sortie**
- Rôle de l'épikarst et de la zone non-saturée
→ **Suivi isotopique de tout le continuum atmosphère-sol-aquifère-eau souterraine**



CONCLUSION

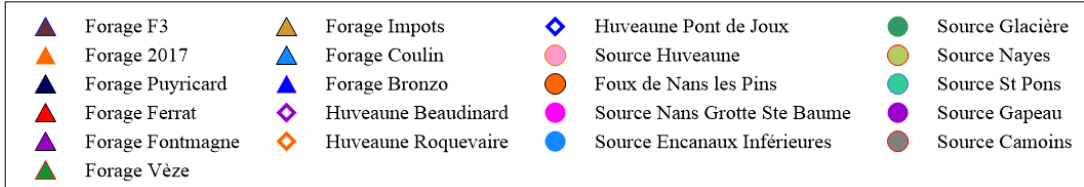
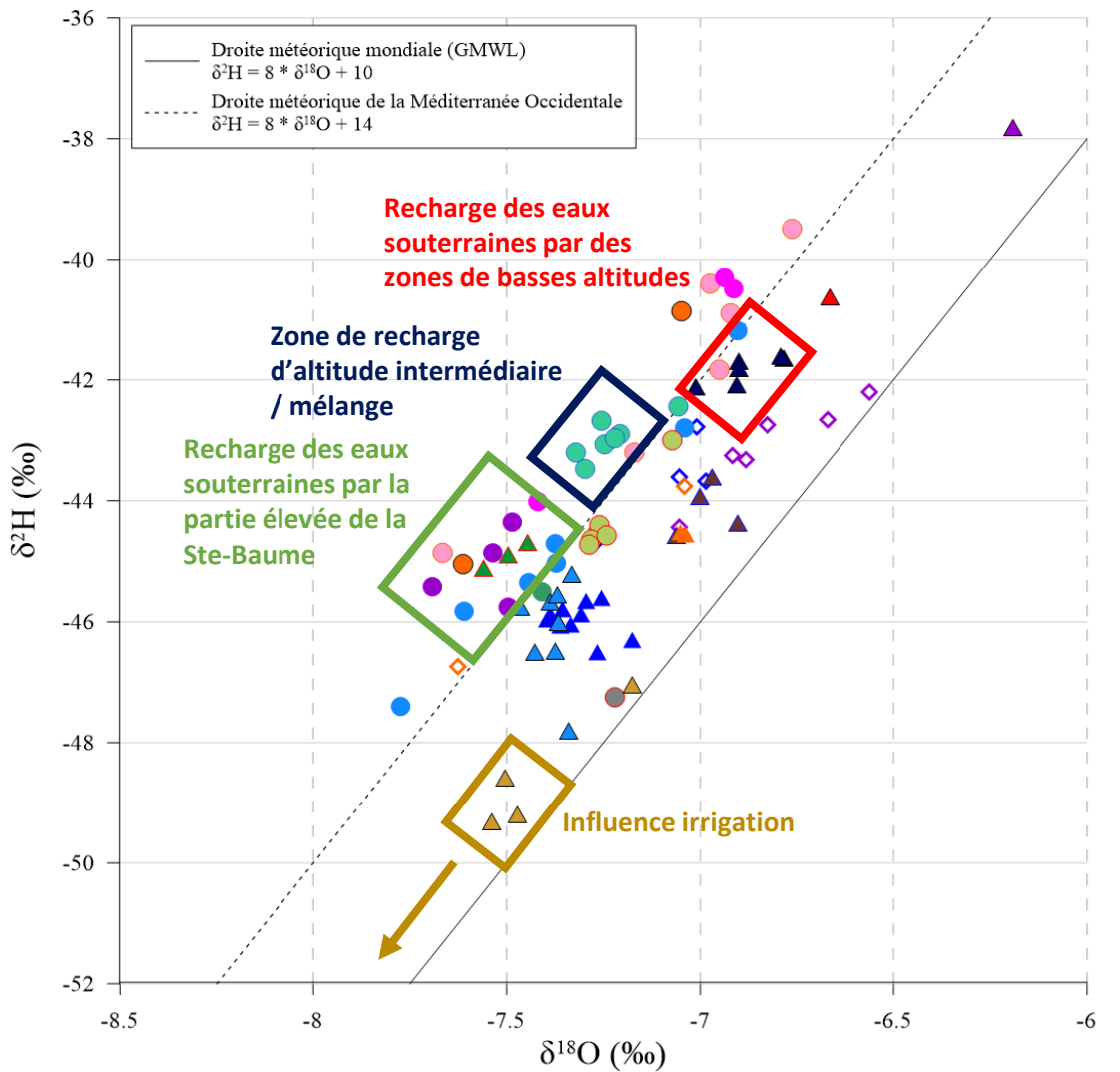


Apport pour la connaissance de l'hydrogéologie régionale

- Deux faciès chimiques principaux dépendants de la nature des roches
- La nappe alluviale d'Aubagne représente une ressource d'intérêt
- Rôle de l'irrigation sur la nappe alluviale

Organisation des écoulements

- Zone de mélange des masses d'eau régionale au contact entre Ste-Baume, Beausset et plaine d'Aubagne

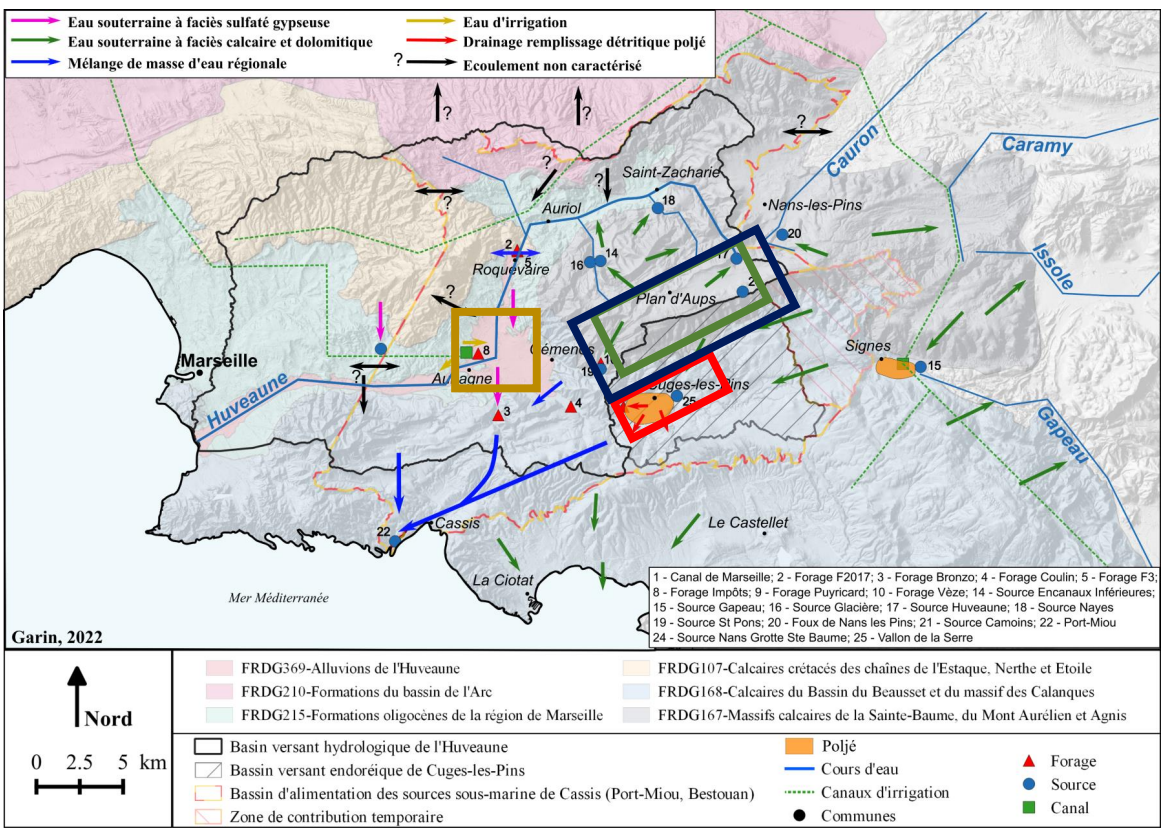


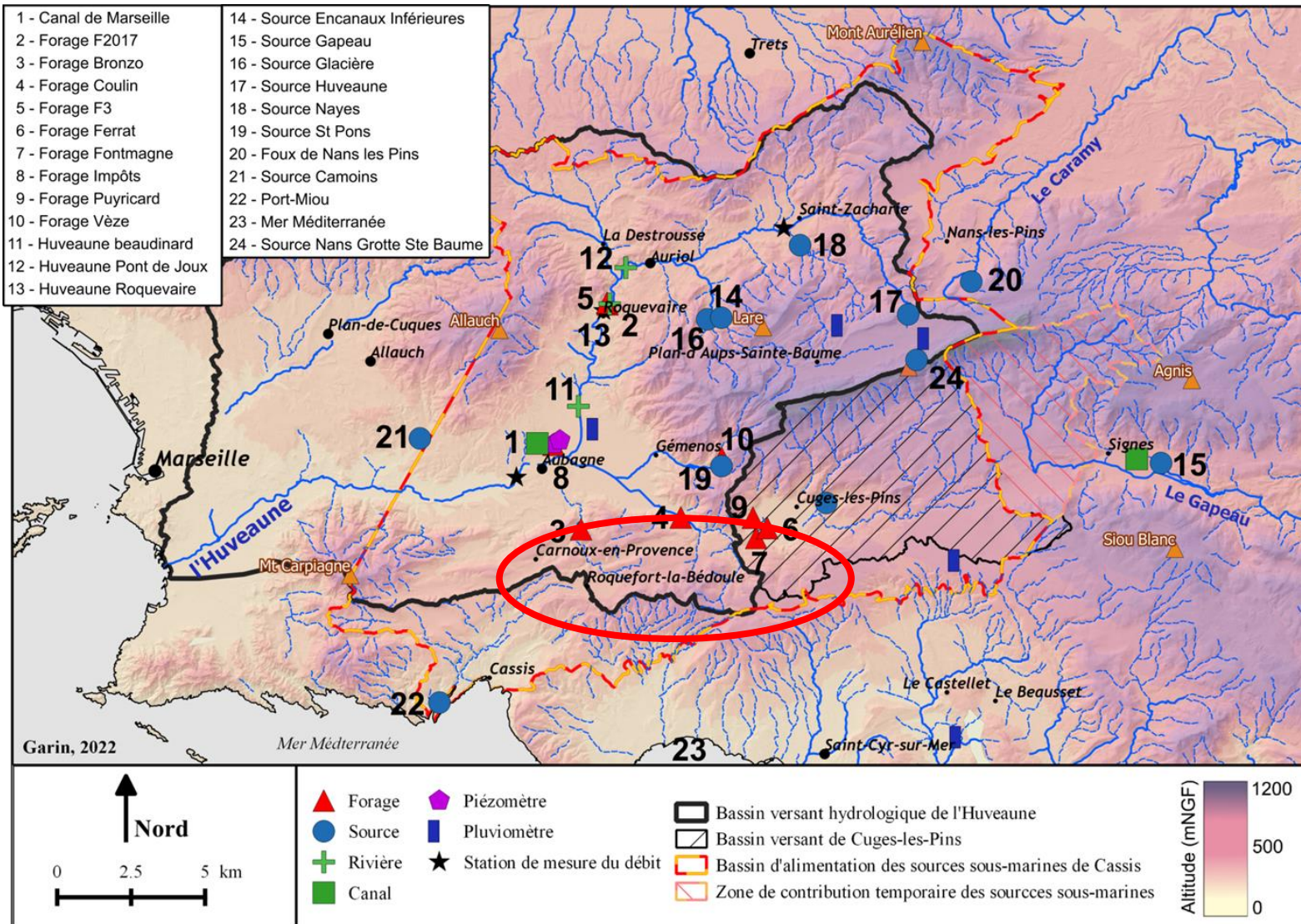
Apport pour la connaissance de l'hydrogéologie régionale

- Un outil de classification des masses selon les isotopes stables

Organisation des écoulements

- Karstification développée sur le massif de la Sainte-Baume
- Réservoirs de grande dimension et écoulement inertiel au sud





Investigation nouvelle ressource ?

Forage dans le karst de Roquefort-la-Bédoule/Carnoux ?

- Interprétation des pompages d'essai par la méthode de la dérivée
- Analyse de traceurs spécifiques pour caractériser la masse d'eau :

Altitude de recharge/mélange → $d^{18}O$ et d^2H

Origine des sulfates/mélange → $d^{34}S_{SO_4}$ et $d^{18}O_{SO_4}$

Origine de la salinité → B, $d^{11}B$, Li et $d^{11}Li$, $^{87}Sr/^{86}Sr$

Remerciements

