

La lagune et son bassin-versant

Vincent Bailly-Comte BRGM

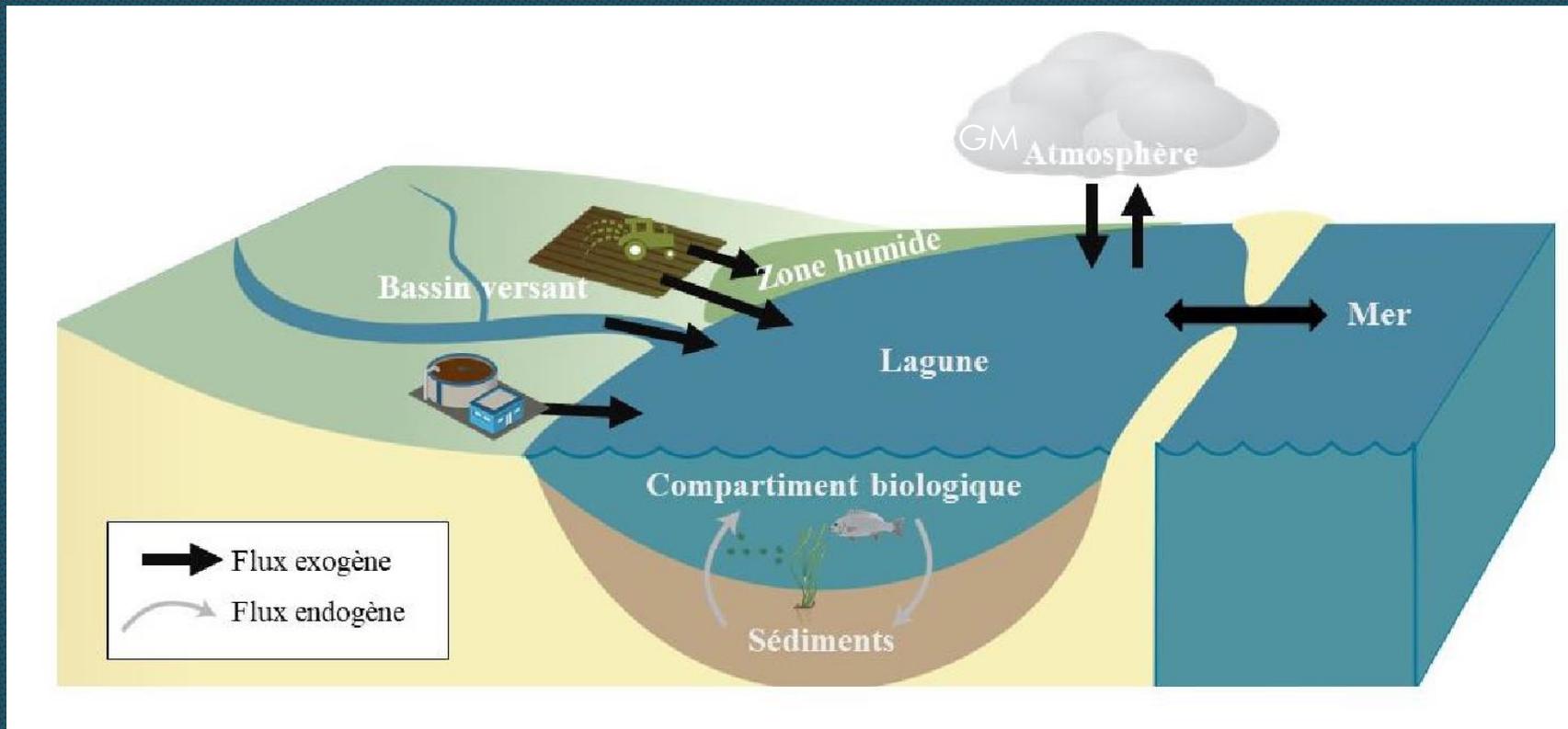
- ❑ Fonctionnement hydrologique et hydrogéologique
 - ❑ Relation surface/souterrain et diversité des aquifères
 - ❑ Représentativité de la mesure hydrologique
 - ❑ Ex de bilan en nutriments sur la lagune de l'Or

- ❑ L'intrusion saline et le biseau salé
 - ❑ Mesures
 - ❑ Origine et facteurs de contrôle
 - ❑ Cas complexes : multi-couche, aquifères karstiques

La lagune et son BV

Fonctionnement hydro-géo-logique des lagunes

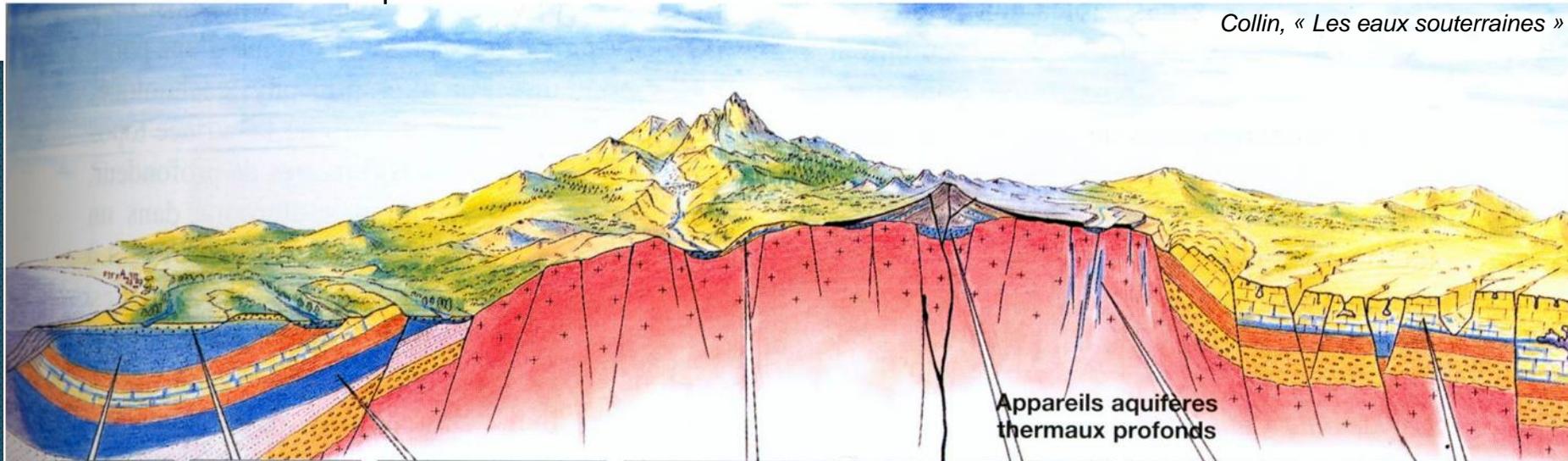
Bilan hydrologique et origine des flux d'eau et de solutés : Plusieurs compartiments
⇒ Origine exogène ou endogène des flux



La lagune et son BV

Fonctionnement hydro-géo-logique des lagunes

Diversité des formations aquifères



Collin, « Les eaux souterraines »

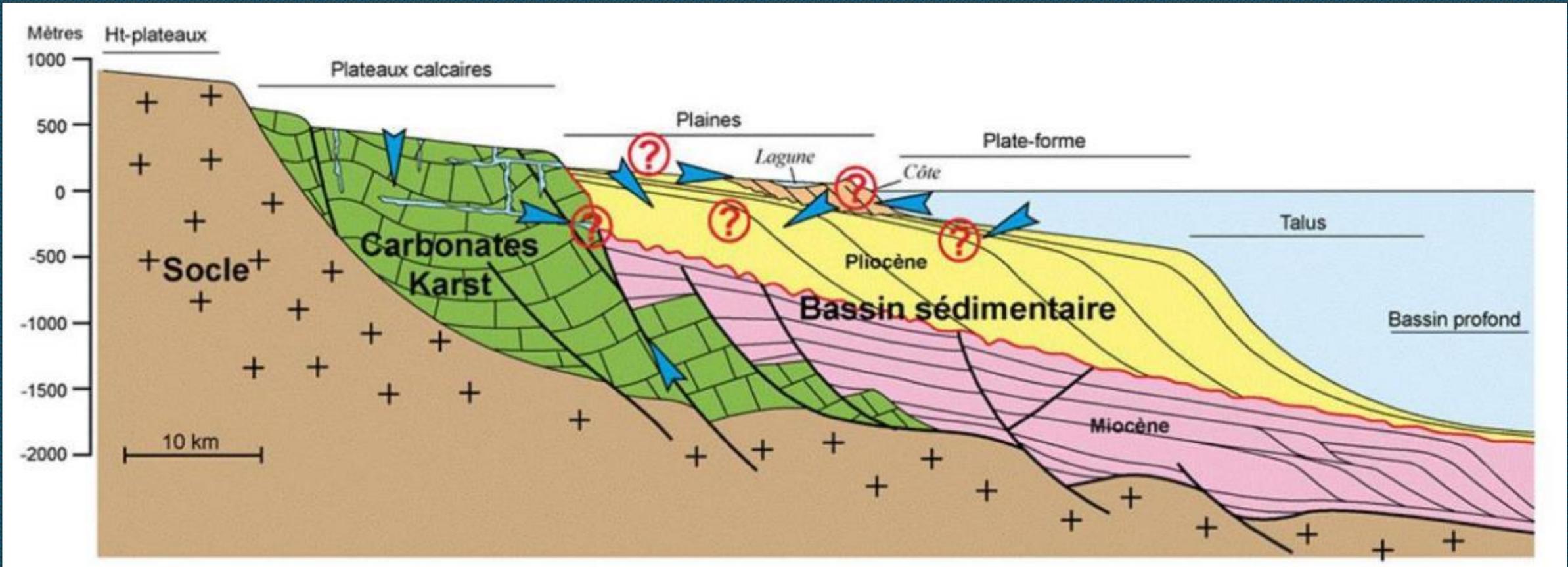
<p>Aquifères de roches sédimentaires (libres)</p> <p>Calcaire, craie, grès</p> <p>DEBIT: moyen à élevé</p>	<p>Sables et alluvions des vallées</p> <p>Graviers et sables</p> <p>DEBIT: bon à élevé</p>	<p>Aquifères sédimentaires profonds (captifs)</p> <p>Formations sédimentaires poreuses.</p> <p>Calcaire, craie, grès</p> <p>DEBIT: bon à élevé</p>	<p>Dépôts glaciaires (moraines)</p> <p>Association de blocs, argiles, graviers, sables</p> <p>DEBIT: très variable</p>	<p>Aquifères volcaniques</p> <p>Laves et scories</p> <p>DEBIT: excellent dans les scories, faible dans les laves</p>	<p>Roches dures fissurées</p> <p>Fractures dans le granite ou autres roches cristallines</p> <p>DEBIT: faible à moyen</p>	<p>Aquifères karstiques</p> <p>Cavités dans le calcaire compact</p> <p>DEBIT: très variable</p>
--	--	--	--	--	---	---

En France, les aquifères karstiques et alluviaux constituent l'essentiel des ressources en eau souterraine
 Sur le pourtour Méditerranéen, le karst alimente plus de 50% de la population et soutien les étiages des cours d'eau / nappes alluviales
 Ex. Lagune de Thau : grande diversité de systèmes hydrogéologiques

La lagune et son BV

Fonctionnement hydro-géo-logique des lagunes

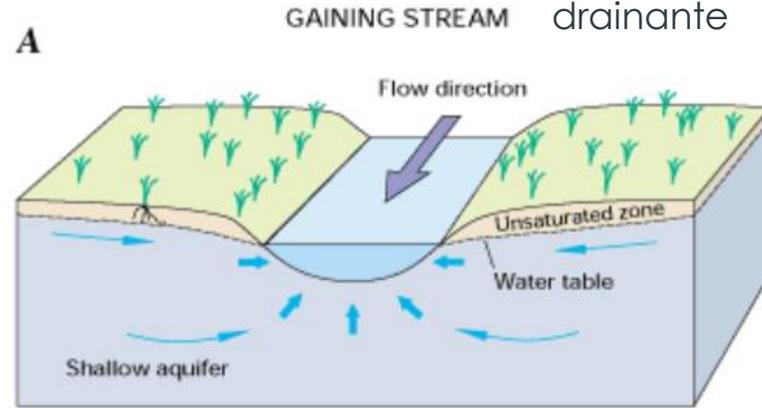
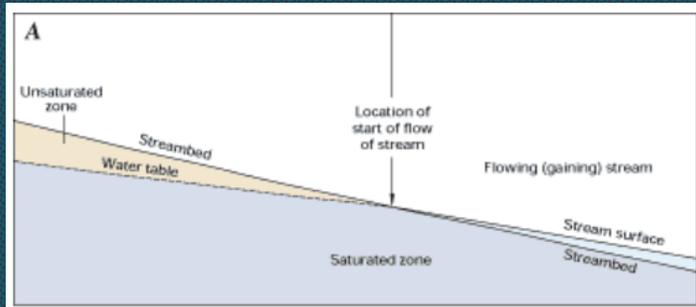
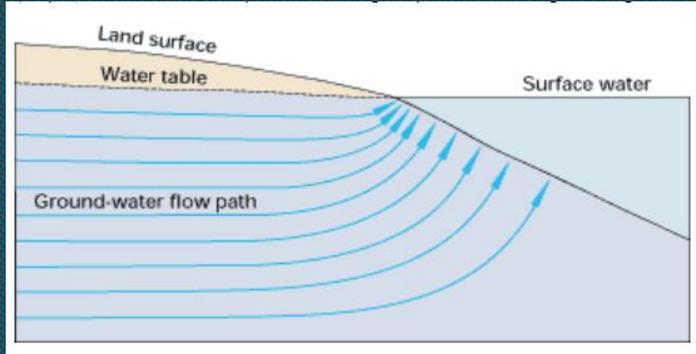
L'exemple de la plaine du Roussillon – lagune de Leucate, projet DEM'EAU Roussillon



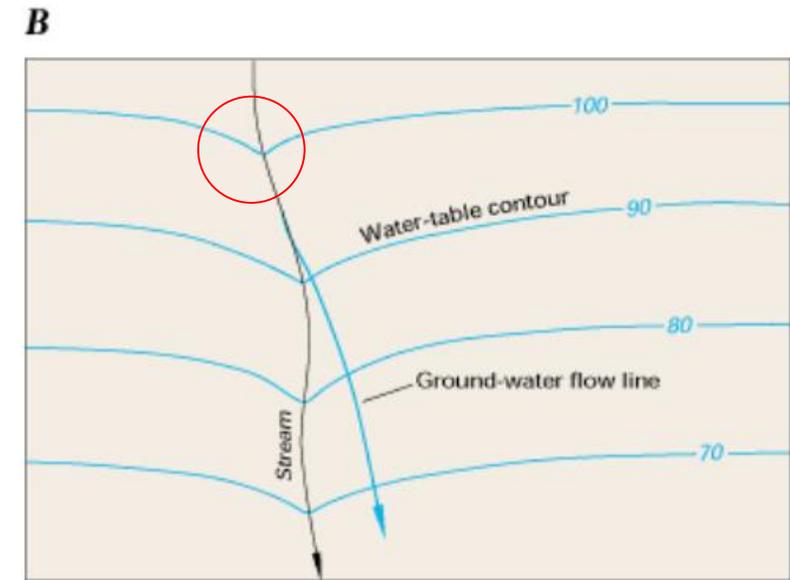
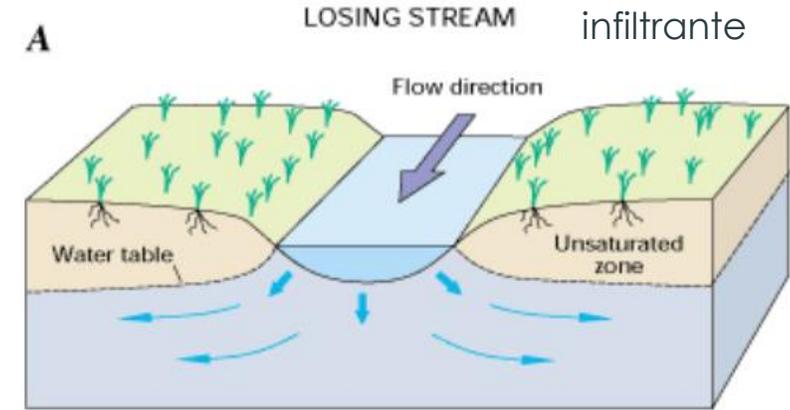
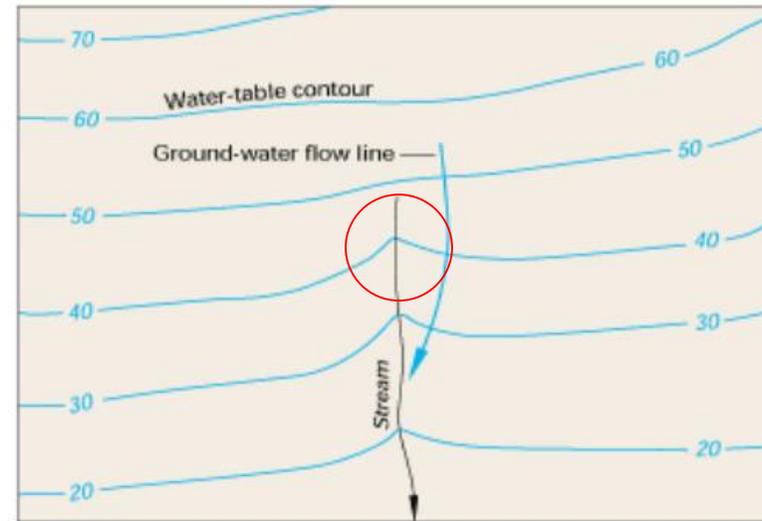
Les relations surface/souterrain Winter, 1998

Analyse spatiale

En coupe



B Vue "du dessus" : carte piézométrique



Les relations surface/souterrain

Analyse temporelle

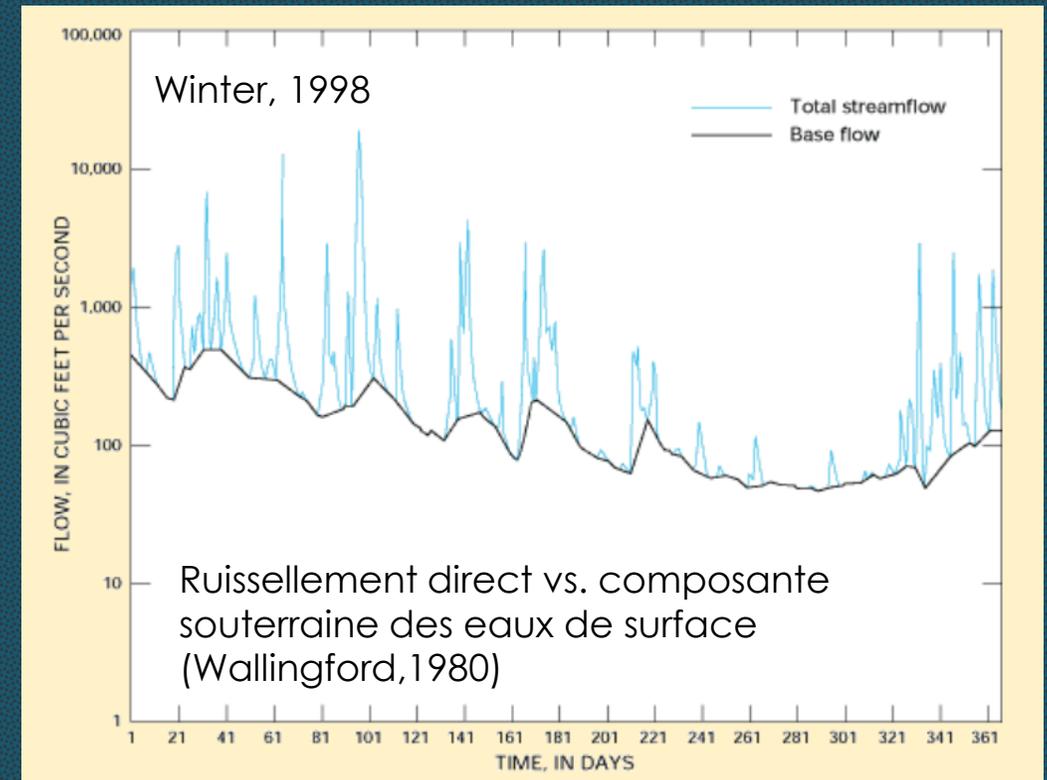
Calcul de l'écoulement de base à partir d'un hydrogramme

Plusieurs méthodes de filtrage.

Les plus utilisées: Wallingford, Chapman, Eckhardt ou encore Lyne et Hollick

Calculables avec des outils BRGM (ESPERE, XLkarst) ou plusieurs toolbox matlab ou R (hydrotoolbox)

+ bilan de masse d'un traceur des apports souterrains



La lagune et son BV

Fonctionnement hydro-géo-logique des lagunes

Représentativité des suivis hydrologiques?

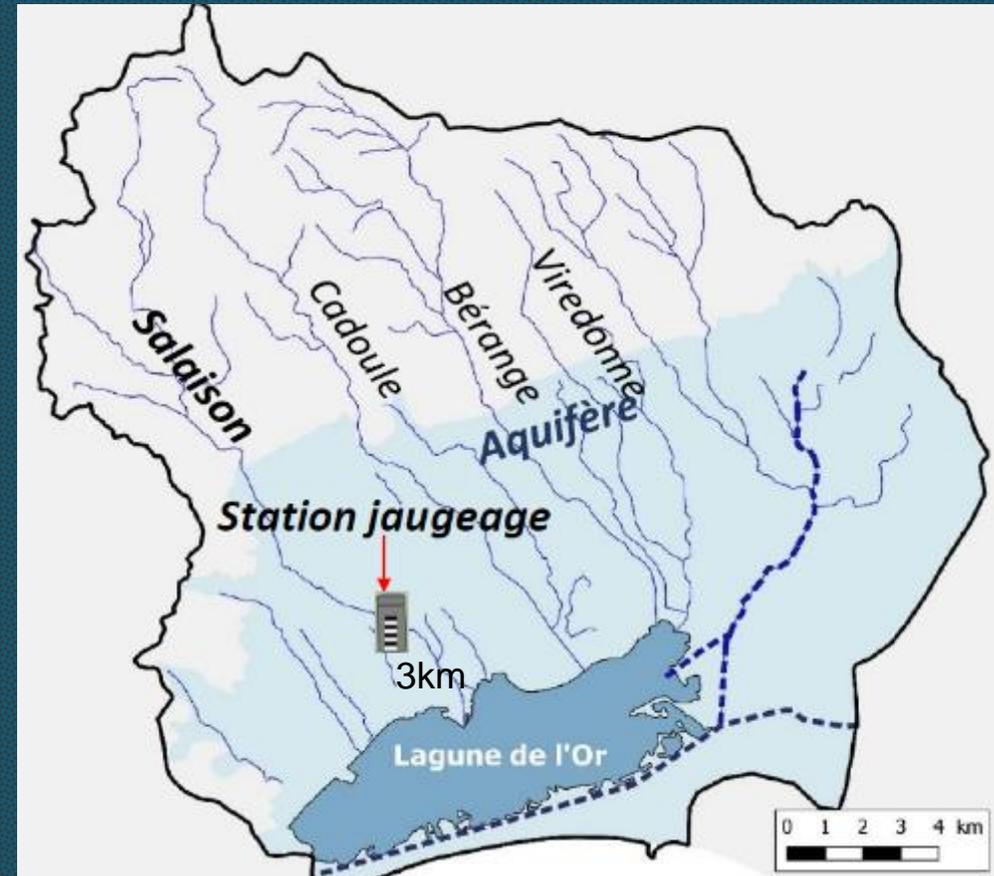
Lagune de l'Or : 410km², BV agricole et urbain (David, 2019)

- Identifier les principaux cours d'eau
- Exploiter les données disponibles

⇒ Salaison = proxy de l'ensemble des cours d'eau versant Nord (60% du BV Nord, Colin et al., 2017)

Position de la station?

- ⇒ Compromis entre contrainte hydraulique et représentativité hydro(géo)logique
- ⇒ Où se réalisent les apports souterrains?



La lagune et son BV

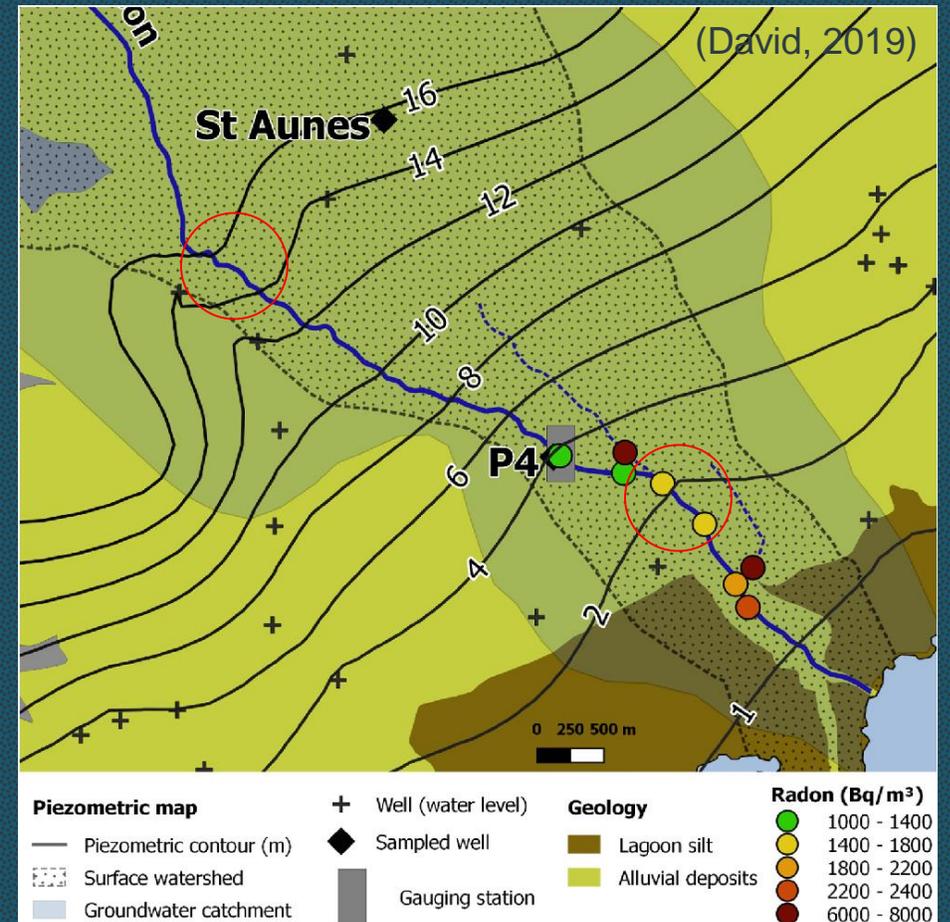
Fonctionnement hydro-géo-logique des lagunes

Recharge en amont, drainage en aval

Faible gradient à la limite de captivité (flux négligeable)

Délimitation du bassin d'alimentation souterrain

Comment quantifier les apports d'eau souterraine en amont et en aval de la station hydrologique et leur influence sur les flux de nutriments ou d'autres solutés?



La lagune et son BV

Fonctionnement hydro-géo-logique des lagunes

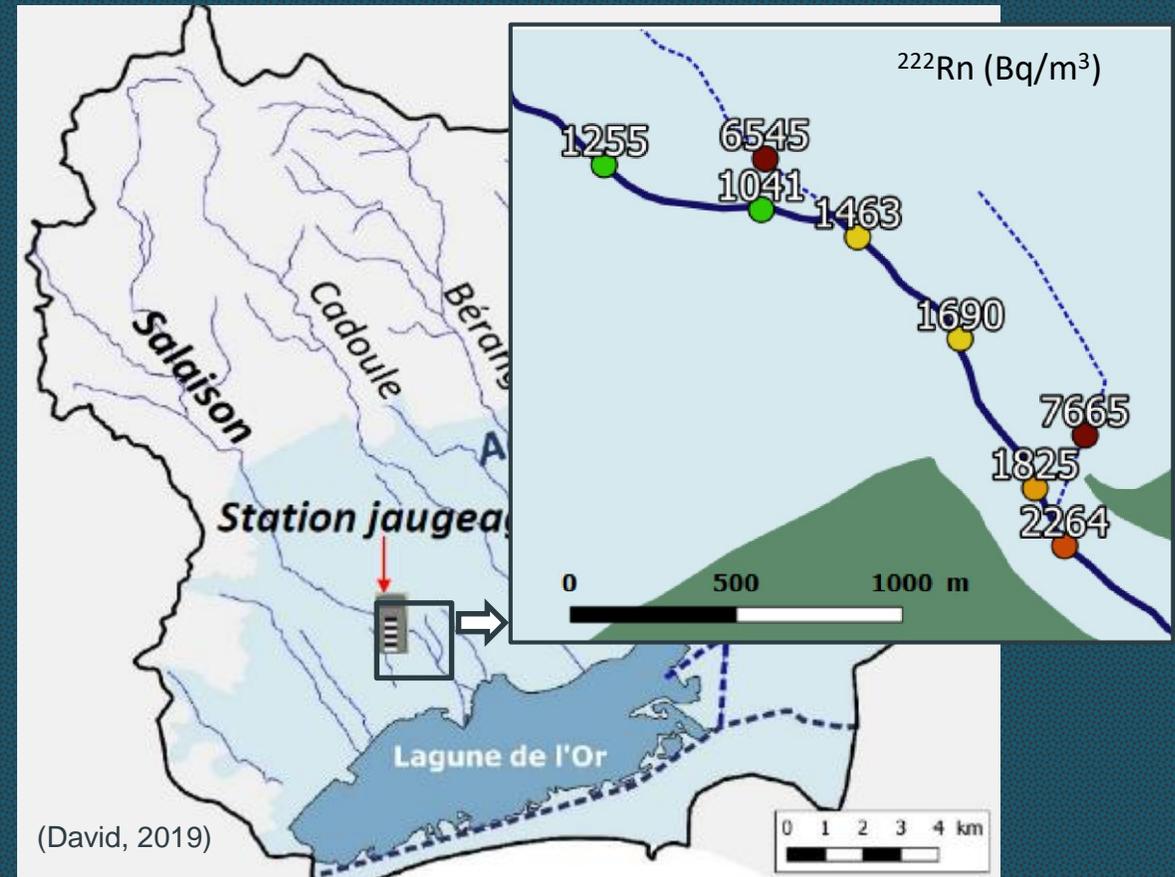
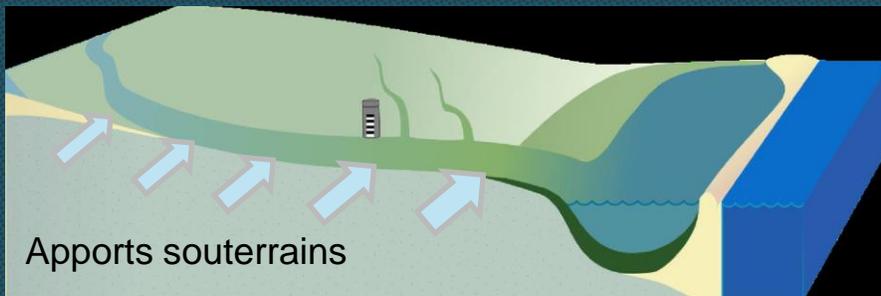
Prospection ^{222}Rn

Signature qui augmente vers l'aval malgré le dégazage (« évasion »)

Traduit l'apport d'eau souterraine en aval de la station jusqu'à la limite de captivité de la nappe

Faible impact sur les flux hydriques...

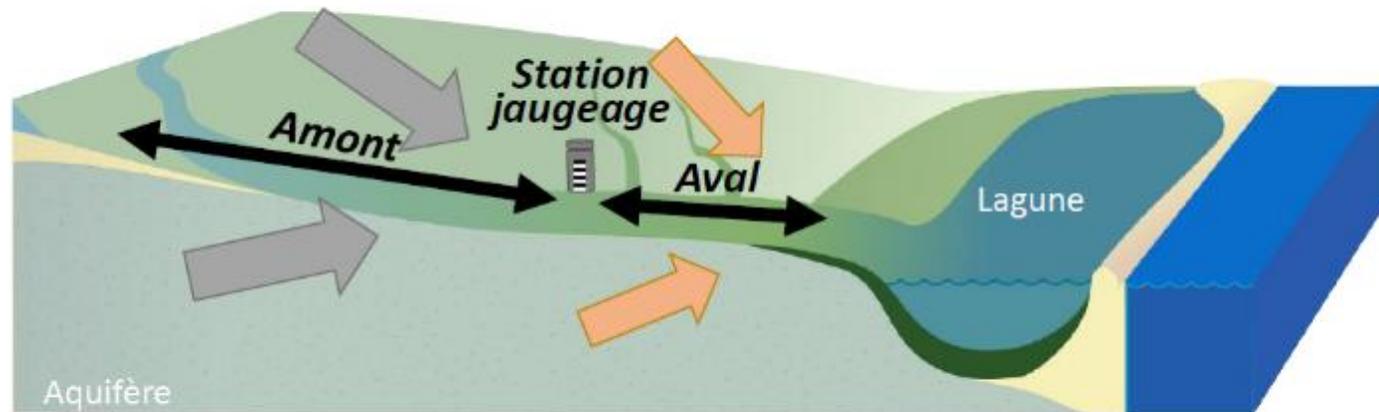
... mais sur les flux de solutés?



La lagune et son BV

Fonctionnement hydro-géo-logique des lagunes

Méthode : quantification des flux de nutriments



→ Flux total et contribution souterraine

Flux d'azote = débit x concentration

Amont – Données et méthodes classiques (DREAL)

- Débit à la station + Séparation d'hydrogramme
- Données physico-chimiques (azote inorganique dissout (NID), conductivité)

Aval – Acquisition de données

- Bilan de masse de radon
- Echantillons d'eau pour dosage de nutriments

(David, 2019)

La lagune et son BV

Fonctionnement hydro-géo-logique des lagunes

En amont : Séparation d'hydrogramme

Méthode de calcul de débit de base

Ex: ESPERE (Wallingford Chapman, Eckard) ou XLKarst (Lyne et Hollick) sur site BRGM, ou packages dédiés à l'hydrologie sous R, matlab etc.

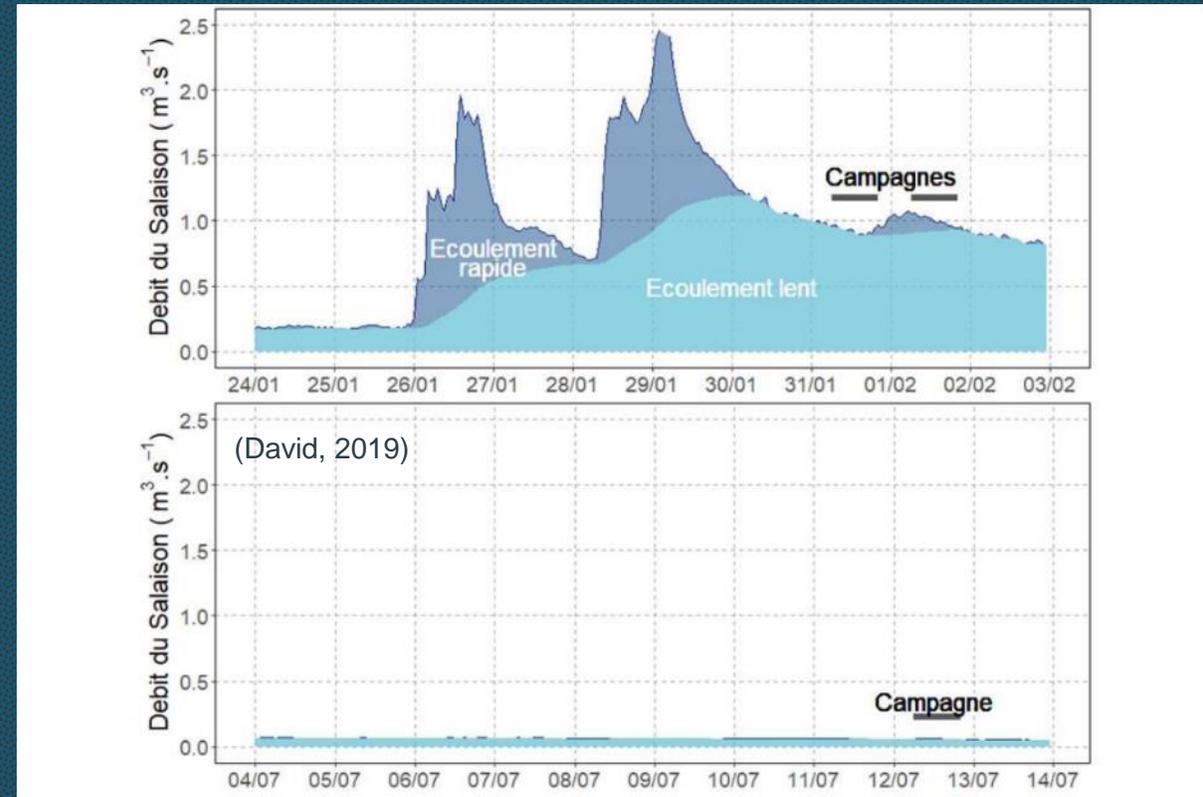


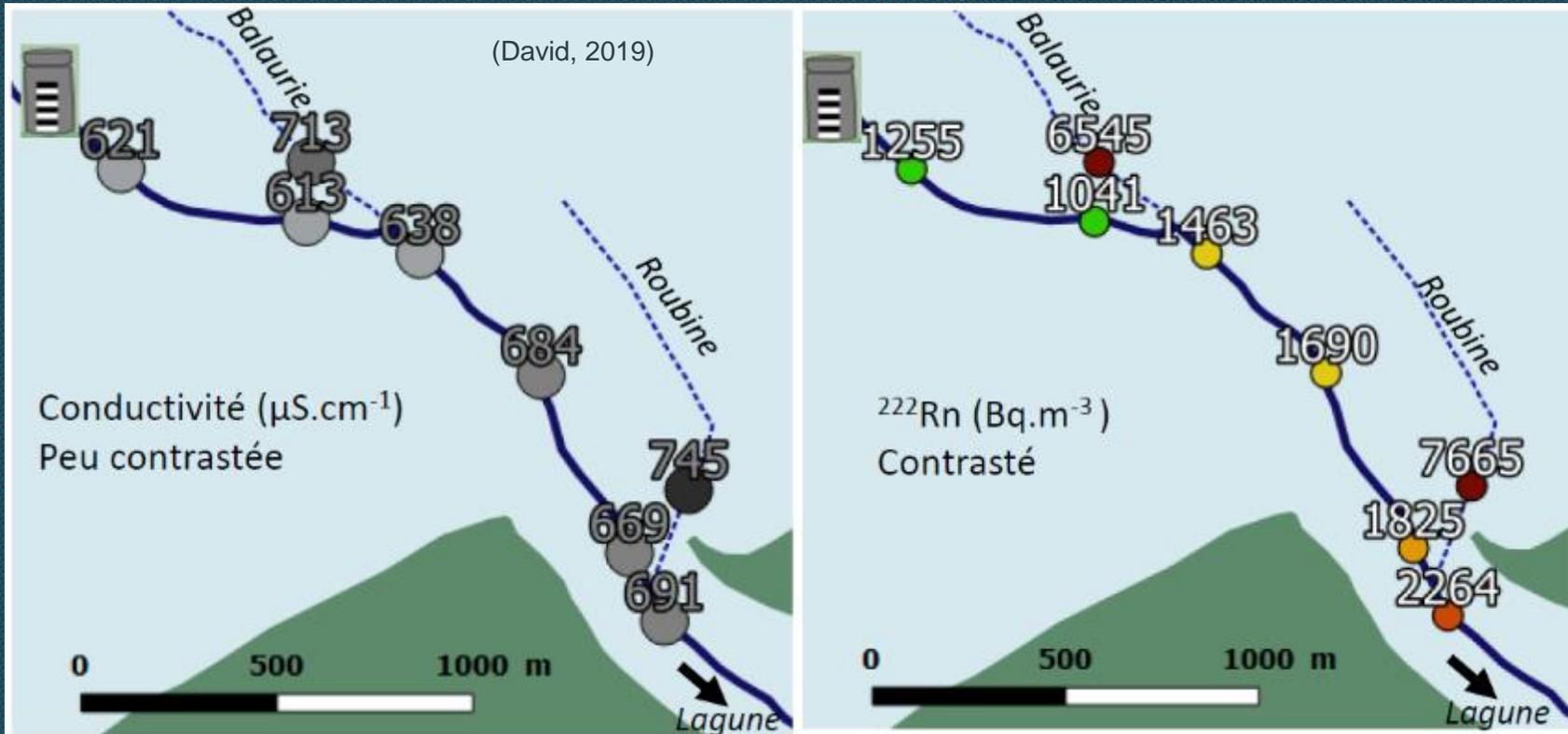
Figure 24: Hydrogramme du Salaison à la station de jaugeage pendant la période d'échantillonnage en hiver (haut) et en été (bas) (Source: HydroFrance).

La lagune et son BV

Fonctionnement hydro-géo-logique des lagunes

En aval : Corrélation par jaugeages ponctuels et/ou bilan de masse d'un traceur

Choix d'un bilan de masse ^{222}Rn



La lagune et son BV

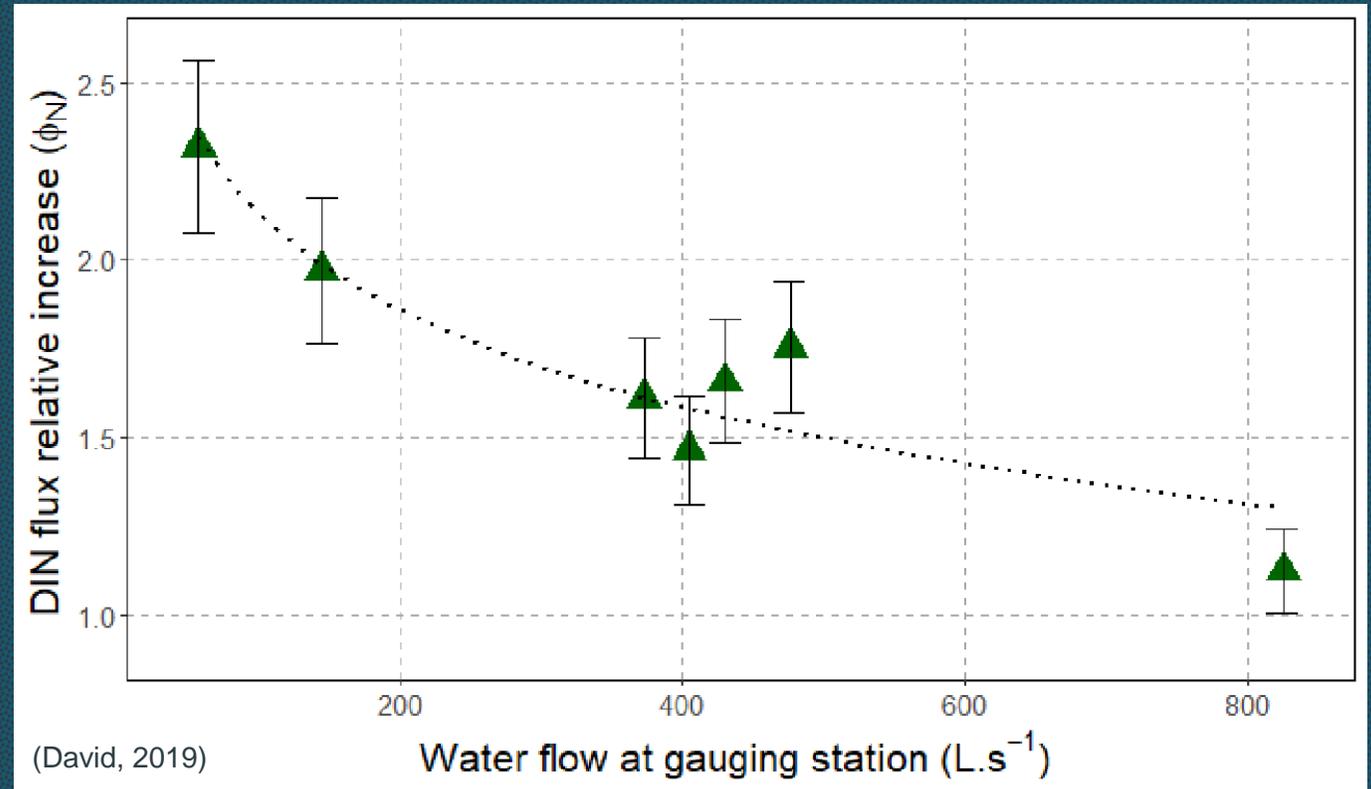
Fonctionnement hydro-géo-logique des lagunes

Résultat:

La station sous-estime de 30 à 60% les apports réels à l'exutoire du Salaison

Les eaux souterraines apportent l'essentiel de l'azote (90%) à la lagune de l'Or : 10 tonnes d'azote en année sèche à 98 tonnes d'azote en année humide

Gestion : Réduire les intrants, mais les actions à l'échelle du système hydrogéologique doivent tenir compte du temps de transfert dans la nappe



La lagune et son BV

Fonctionnement hydro-géo-logique des lagunes

Résultat:

Pour le P, les actions sur les eaux de surface sont déterminantes pour la lagune de l'Or

Selon la lithologie, la recirculation d'eau interstitielle peut également jouer un rôle sur le bilan en nutriment

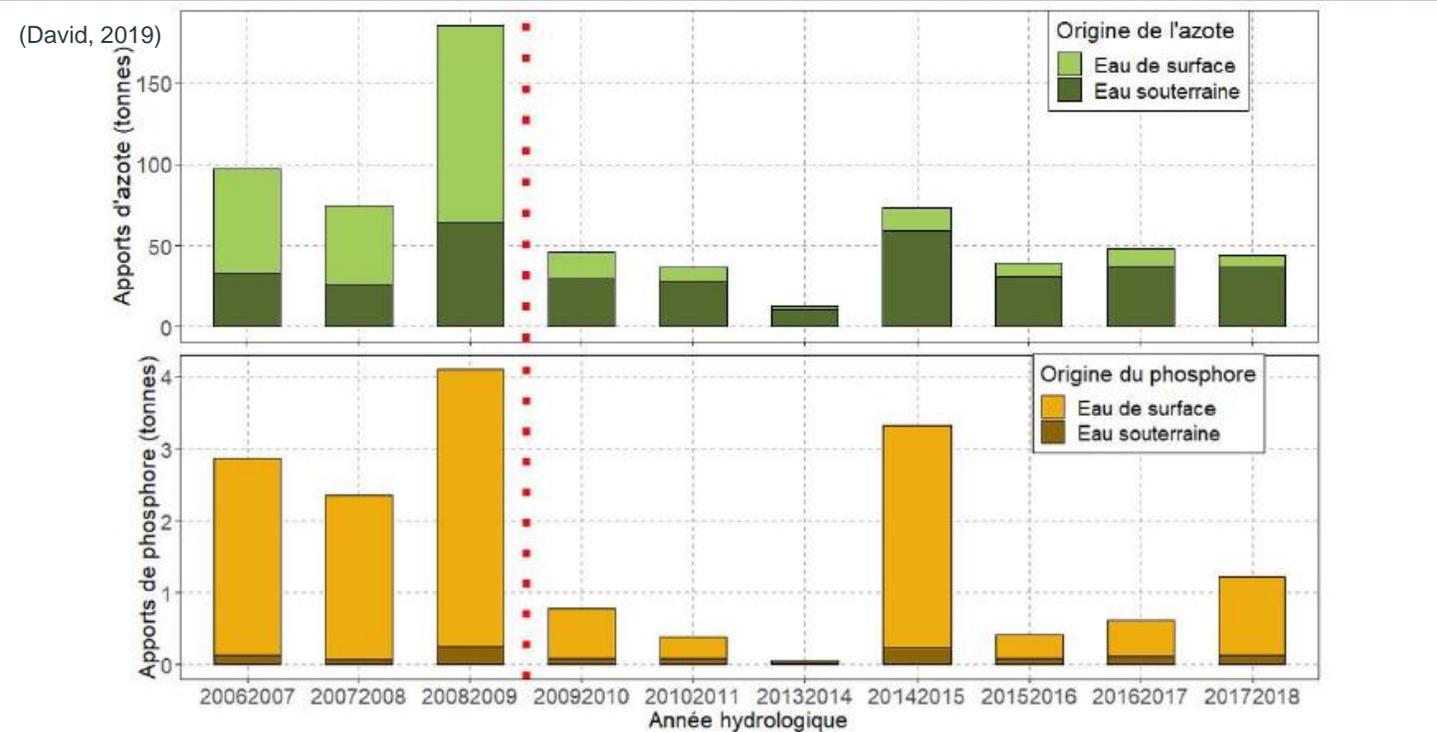


Figure 35: Evolution des apports d'azote total (haut), et de phosphore total (bas) à la lagune de l'Or par le Salaison, par années hydrologiques. Contribution des eaux de surface (couleurs claires) et des eaux souterraines (couleurs foncées). Le trait pointillé rouge représente la mise en place des principales mesures de gestion sur le bassin versant).

La lagune et son BV

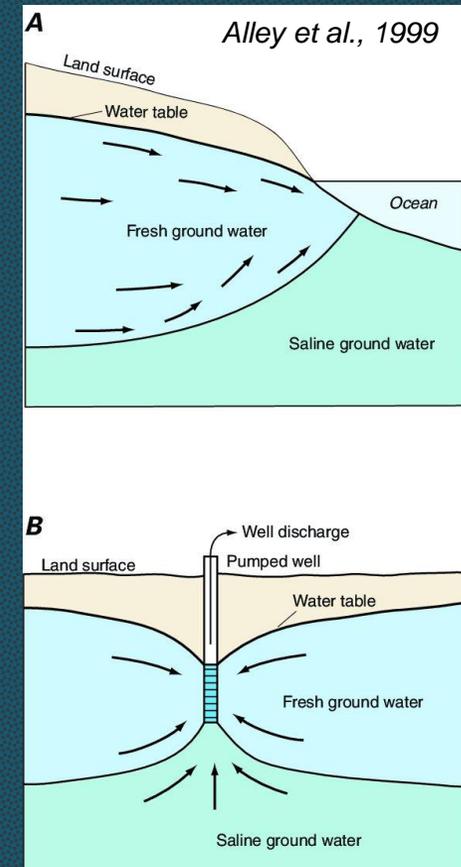
L'intrusion saline et le biseau salé

Les lagunes sont à l'interface entre le milieu continental et marin

Selon les caractéristiques hydrogéologiques du milieu, un biseau salé peut s'observer dans l'aquifère et influencer la salinité de la lagune, et inversement. Ce phénomène naturel peut également être influencé par les actions de l'homme, et conduire à une intrusion saline

Comment connaître l'origine de la salinité et les facteurs de contrôle de la position du biseau salé dans un aquifère?

Comment suivre l'évolution de la salinité dans un aquifère et l'interpréter en 3D?

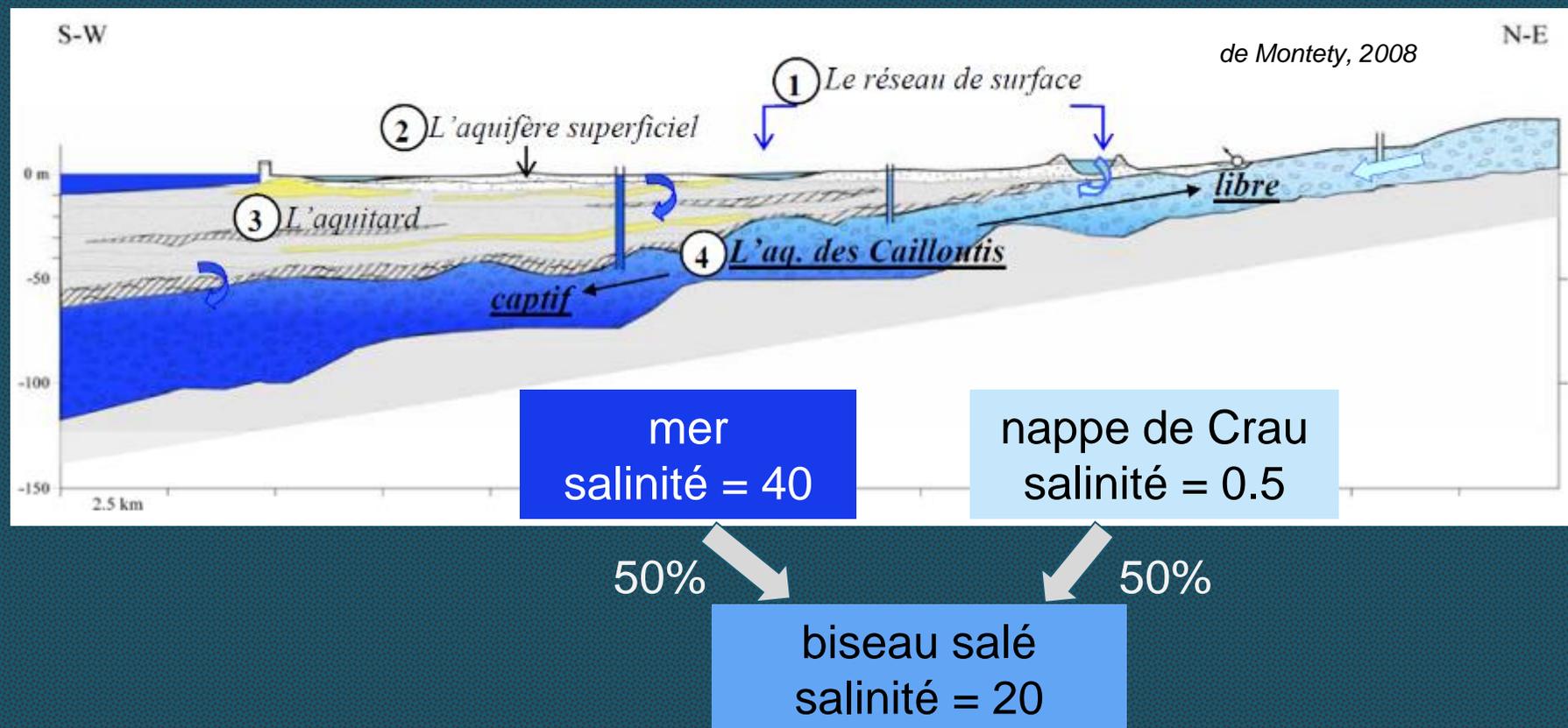




La lagune et son BV

L'intrusion saline et le biseau salé

Ex. de la Crau (nappe libre) et de la Camargue (nappe captive)

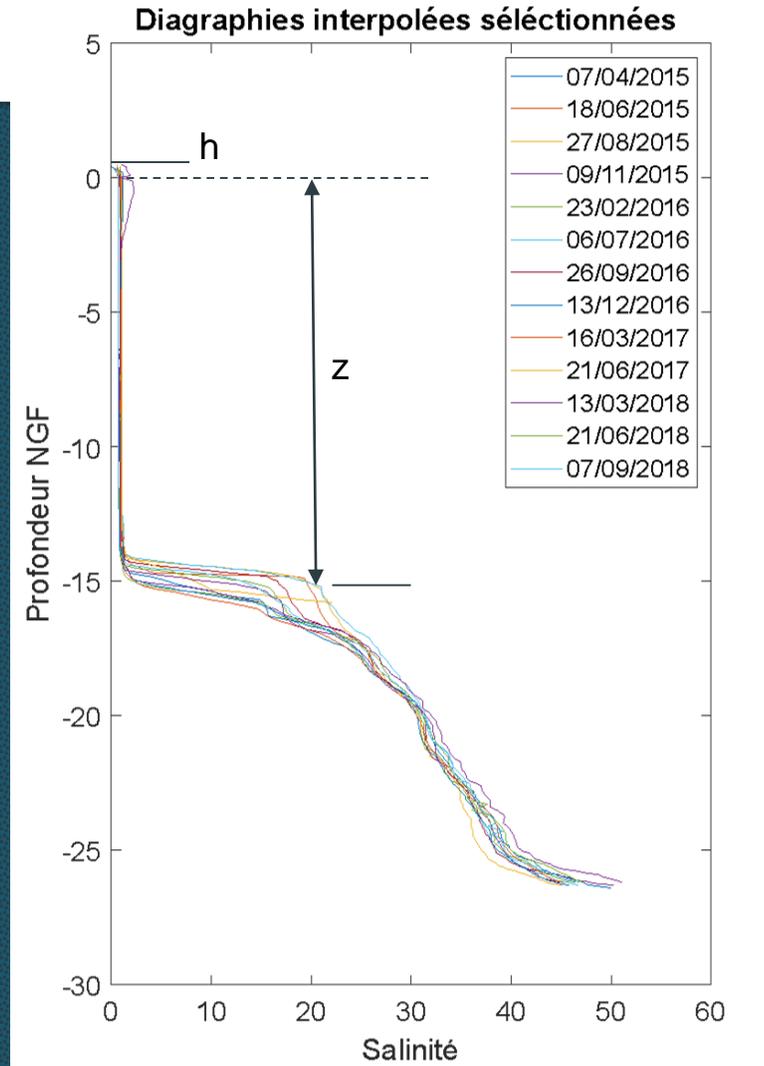
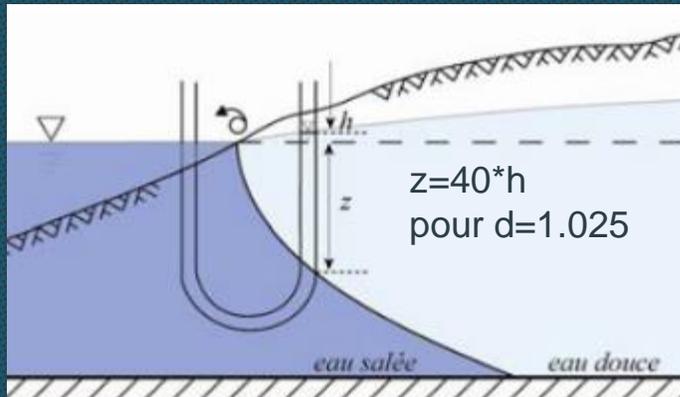


La lagune et son BV

L'intrusion saline et le biseau salé

Analyse spatiale

Relation piézométrie / profil de salinité (Ghyben-Herzberg)



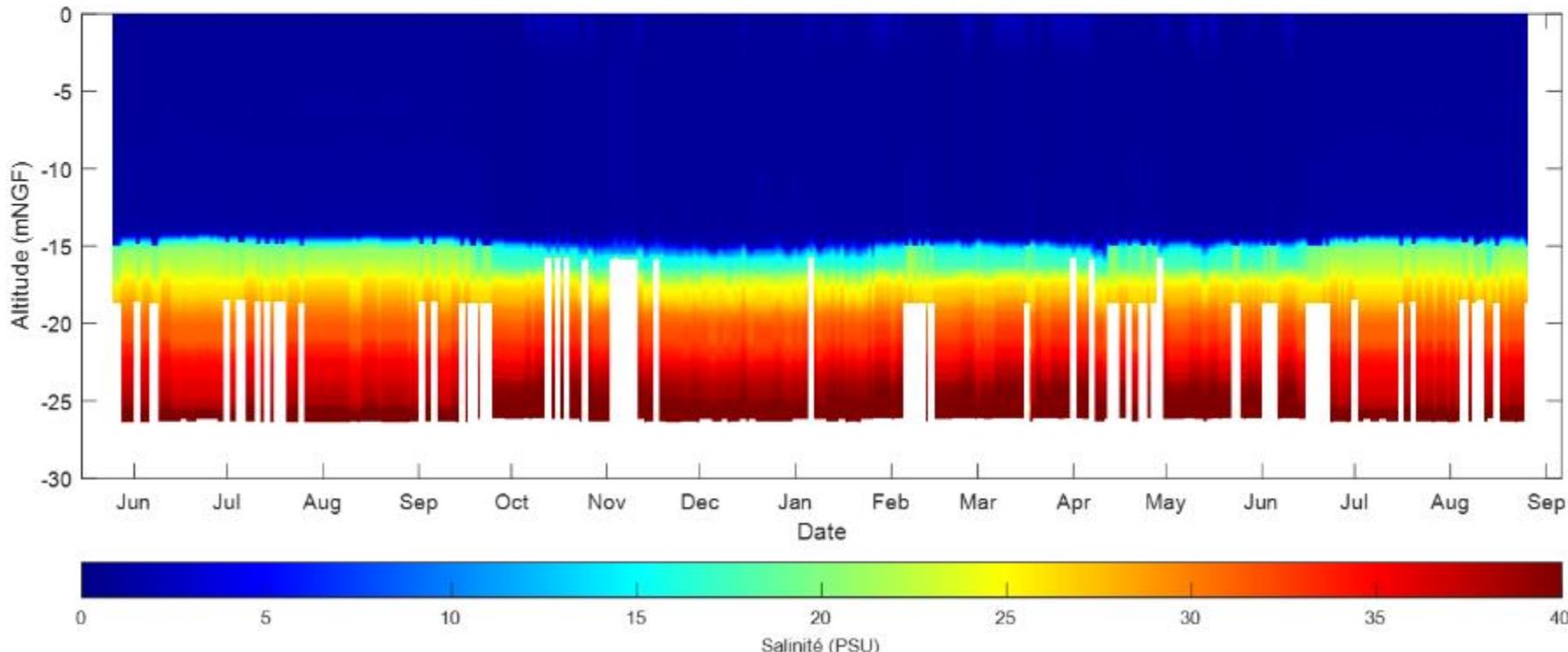
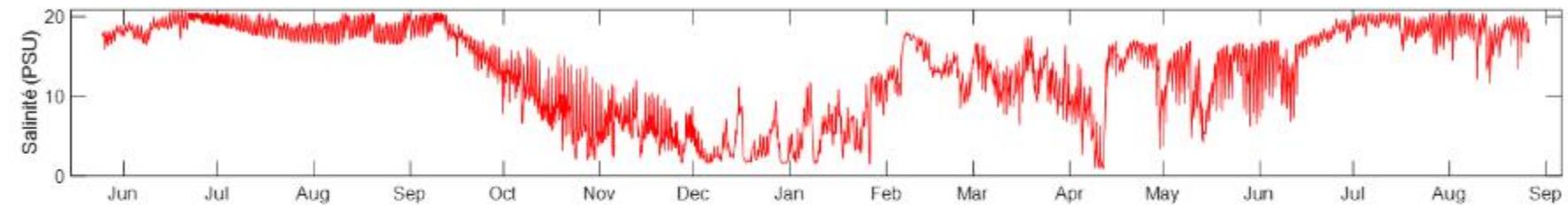
La lagune et son BV

Le biseau salé

Analyse temporelle

Identifier la relation piézométrie / salinité
Diagraphie = $f(t)$

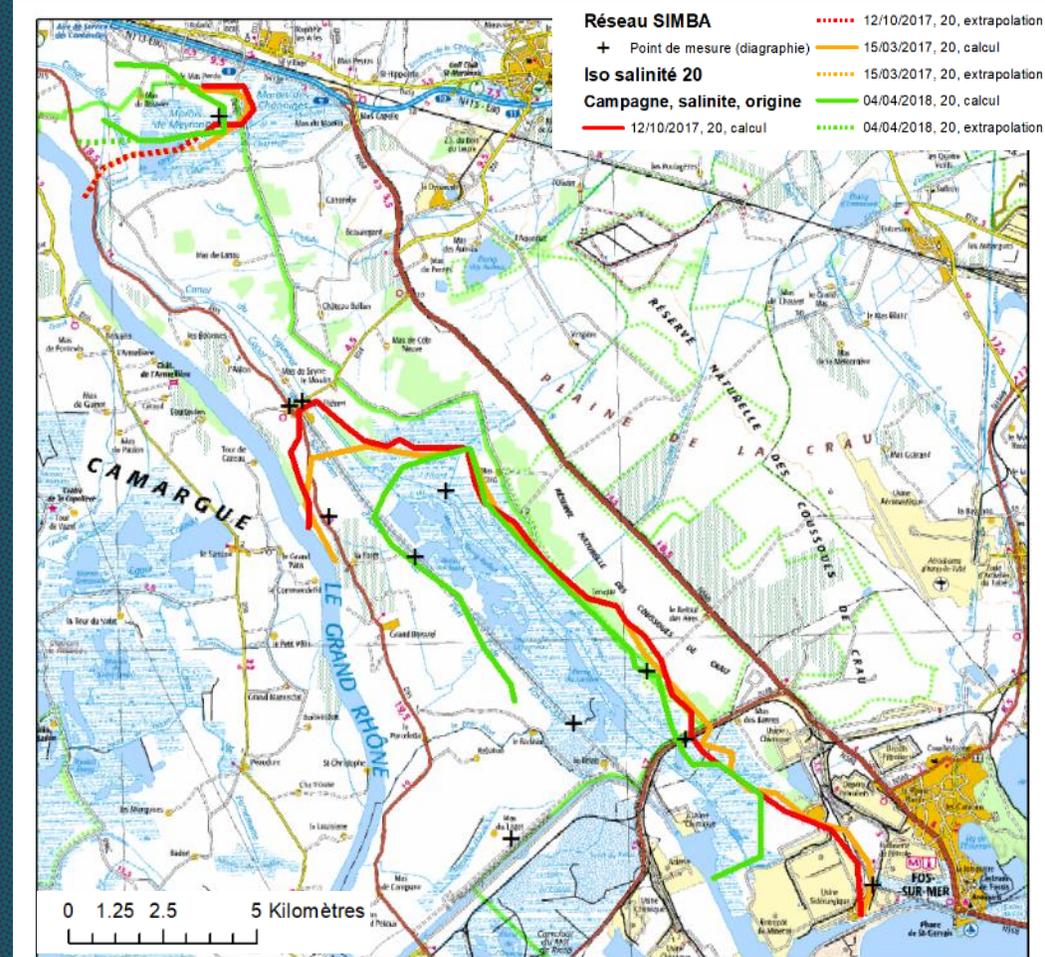
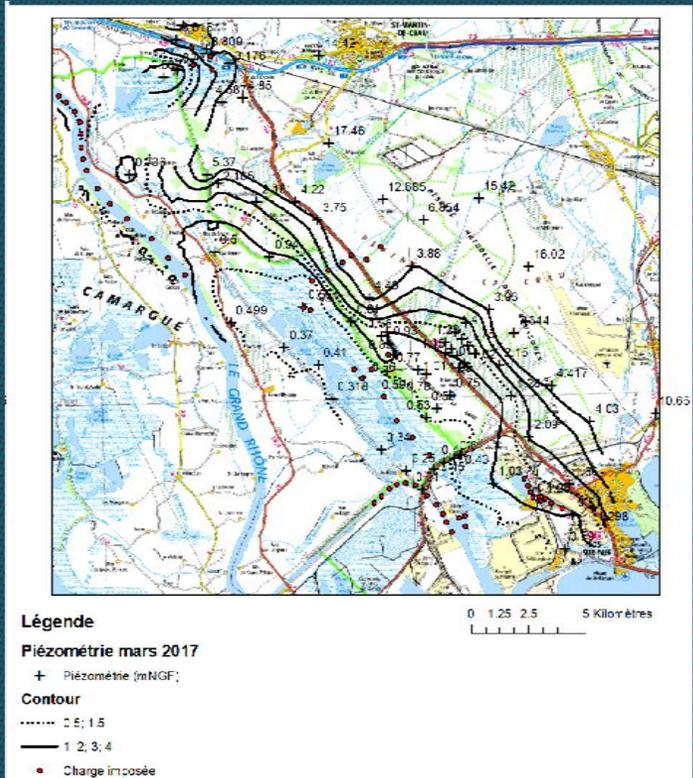
Résultat à comparer au SMD issus de mesures de résistivité électrique (ImaGeau)



La lagune et son BV

Cartographie du biseau salé

- Calculer la limite d'extension du biseau à partir:
- De la piézométrie (Ghyben-Herzberg)
 - De la géométrie de l'aquifère



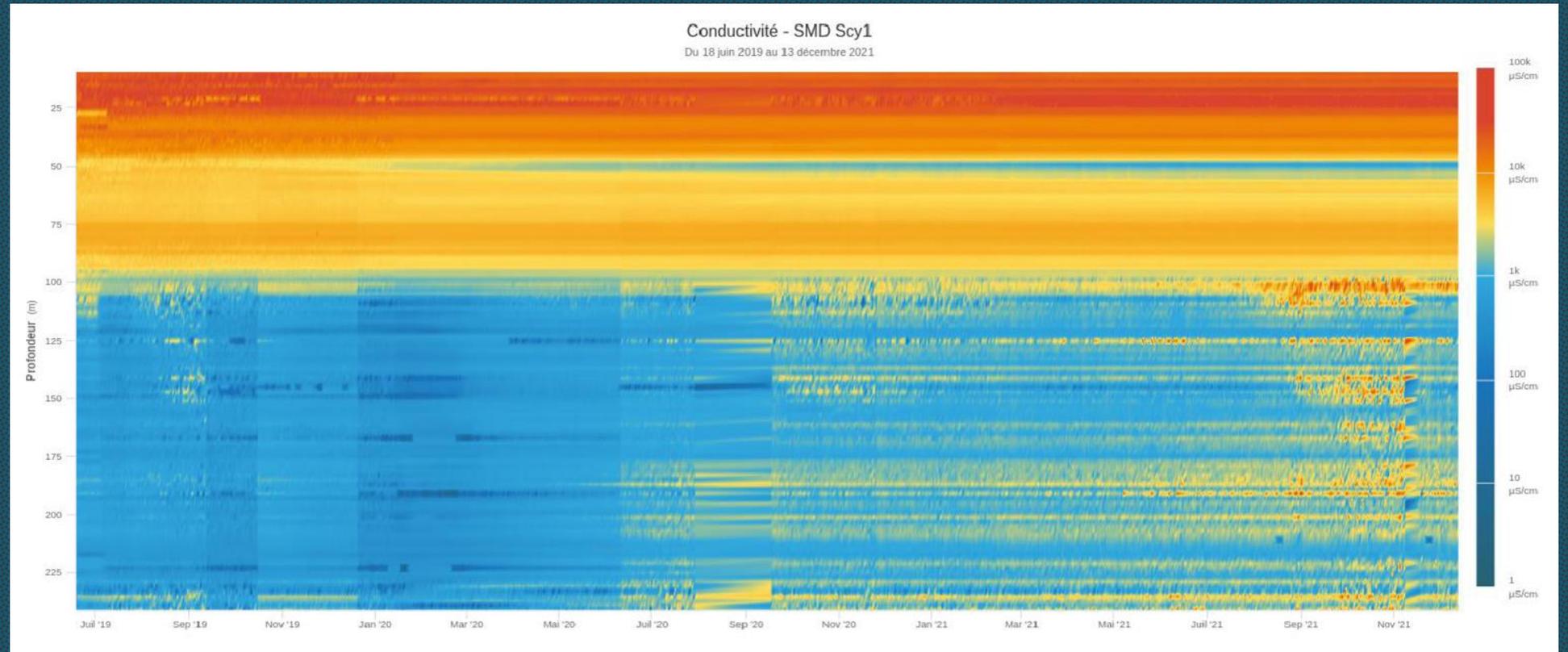
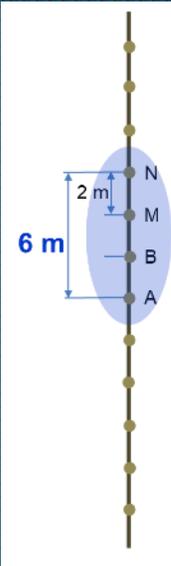
La lagune et son BV

Cartographie du biseau salé

Ex de suivi SMD sur la plaine du Roussillon – Projet Dem'Eaux Roussillon ⇨ Cas complexe!



Salinité 20 ⇔ spC 32mS/cm



La lagune et son BV

Variabilité des apports karstiques

Plusieurs lagunes méditerranéennes sont alimentées par des sources karstiques, en amont de la lagune:

- Fontestramar et Fontdame pour la lagune de Leucate
- Le lavoir de la Palme pour l'étang de la Palme

Mais aussi par des sources sous-marines: La lagune de Thau

Selon les conditions hydrologiques, les flux d'eau, de sel et de nutriments peuvent fortement varier

La lagune et son BV

Variabilité des apports karstiques

Ex. de variation de la conductivité électrique de Fontestramar (courbe rouge) lors d'une crue (courbe bleue)

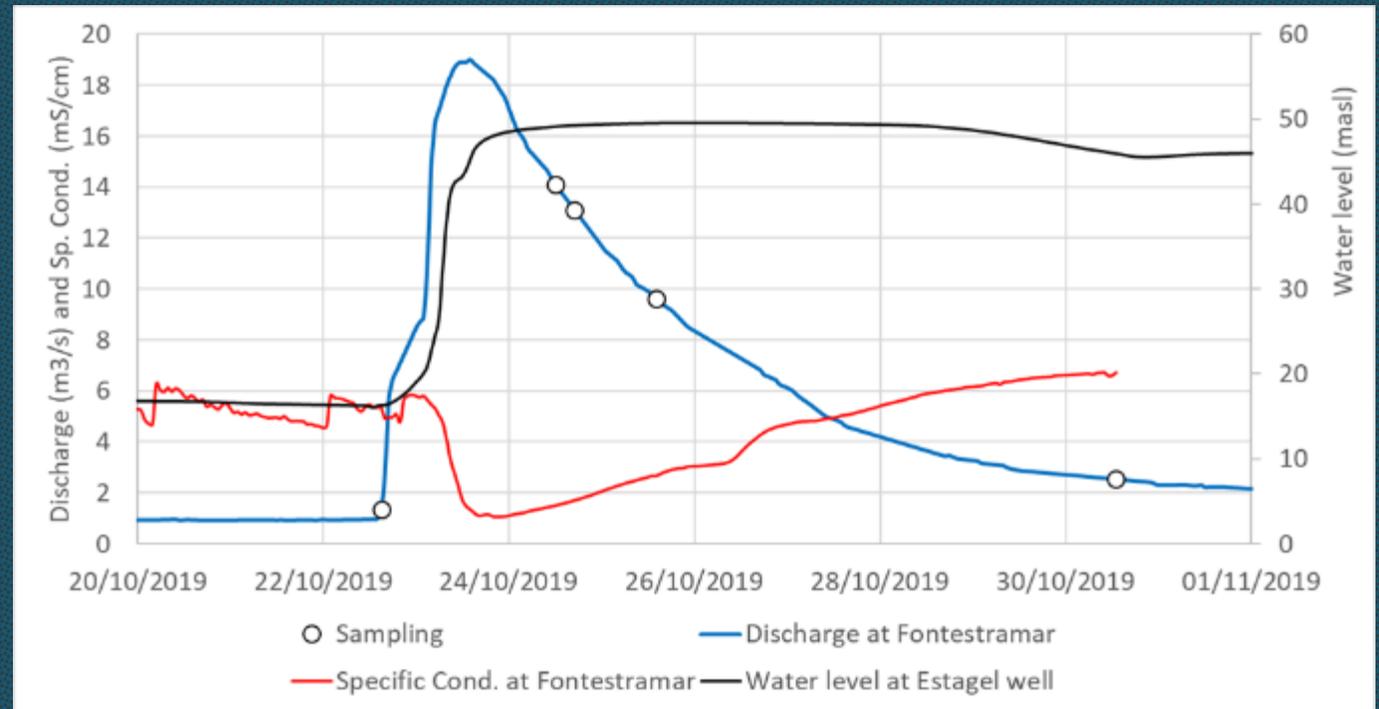
Projet Ec2Co

“How old are groundwater-derived nutrient inputs to coastal lagoons ?”

Les concentrations en nitrates restent stables depuis plus de 20 ans, y compris lors des crues (3 à 4 mg/l)

Seul le débit explique les variations de flux de N:

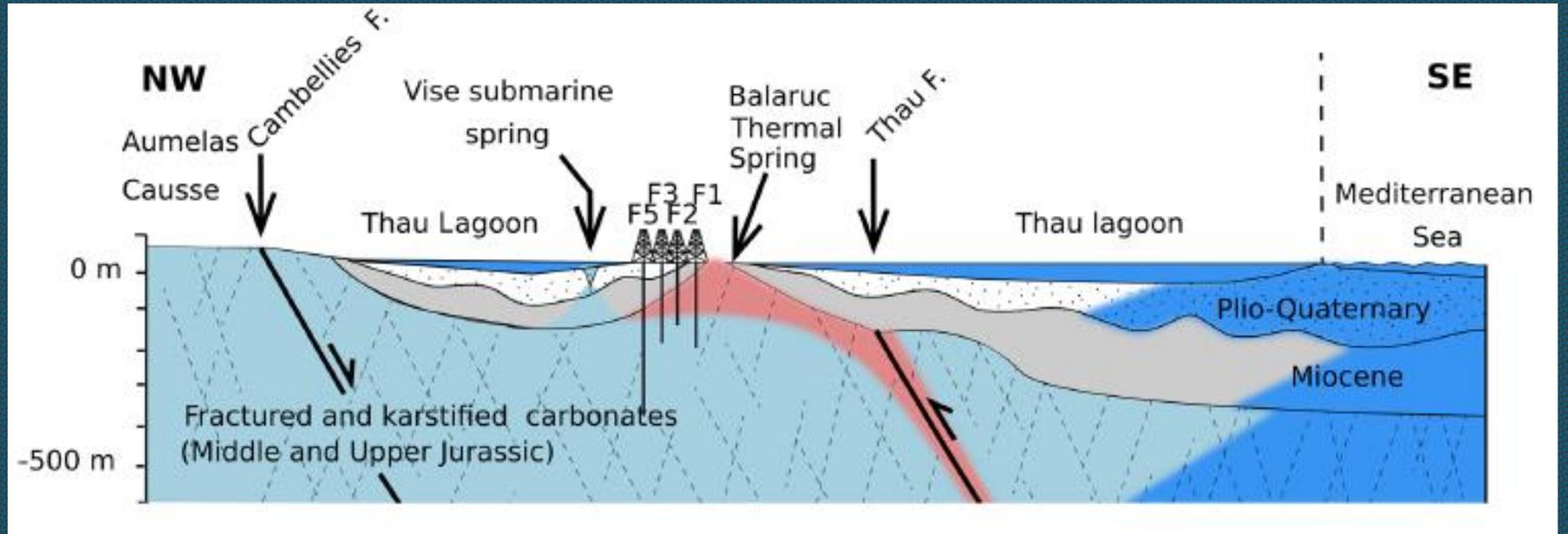
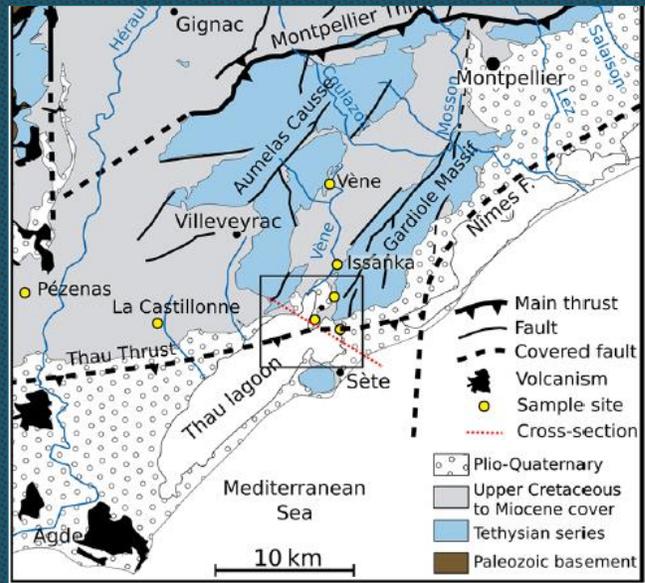
La crue étudiée apporte en 8 jours 4.8 t d’N sous forme de nitrates à la lagune, ce qui représente un peu plus de 6% du flux total annuel.



La lagune et son BV

Variabilité des apports karstiques

Cas particulier des inversacs de la lagune de Thau



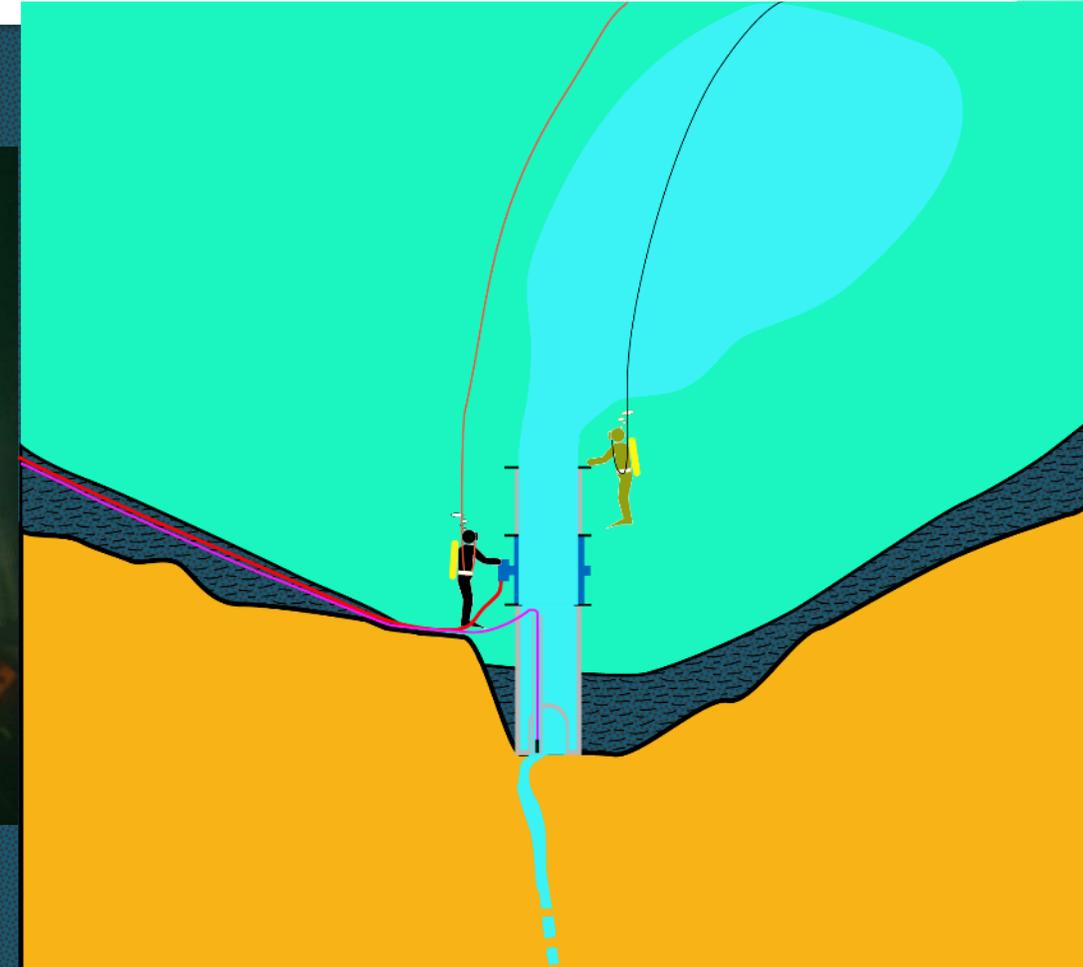
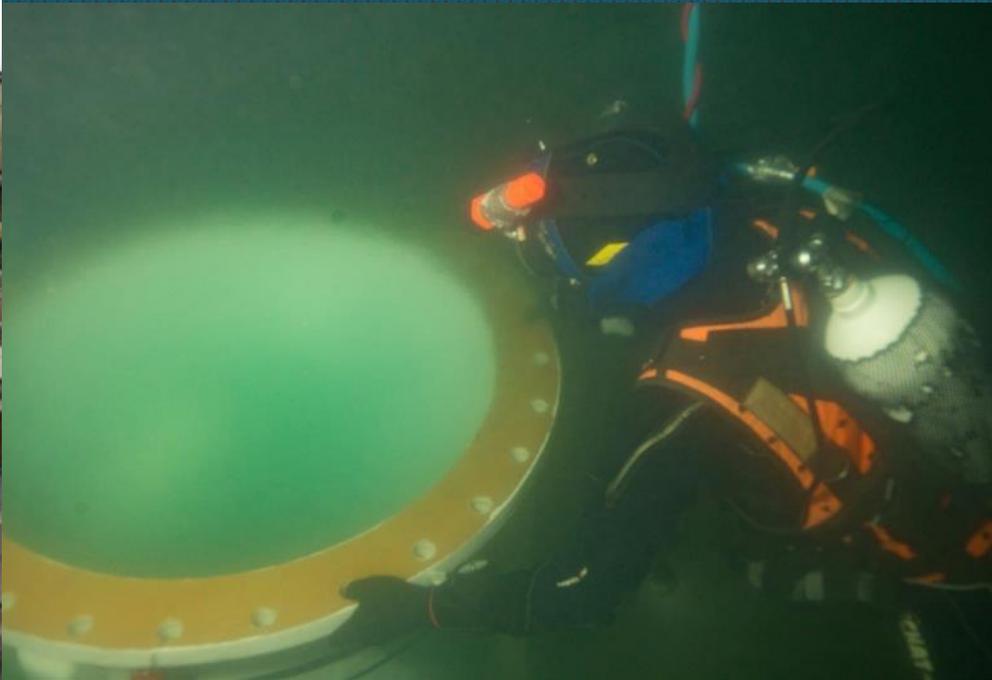
La lagune et son BV

Variabilité des apports karstiques

Tube central diamètre 1000 mm avec débitmètre, sondes de mesure (pression, conductivité, température)
Tube PE pour des prélèvements + suivis fluorescence naturelle

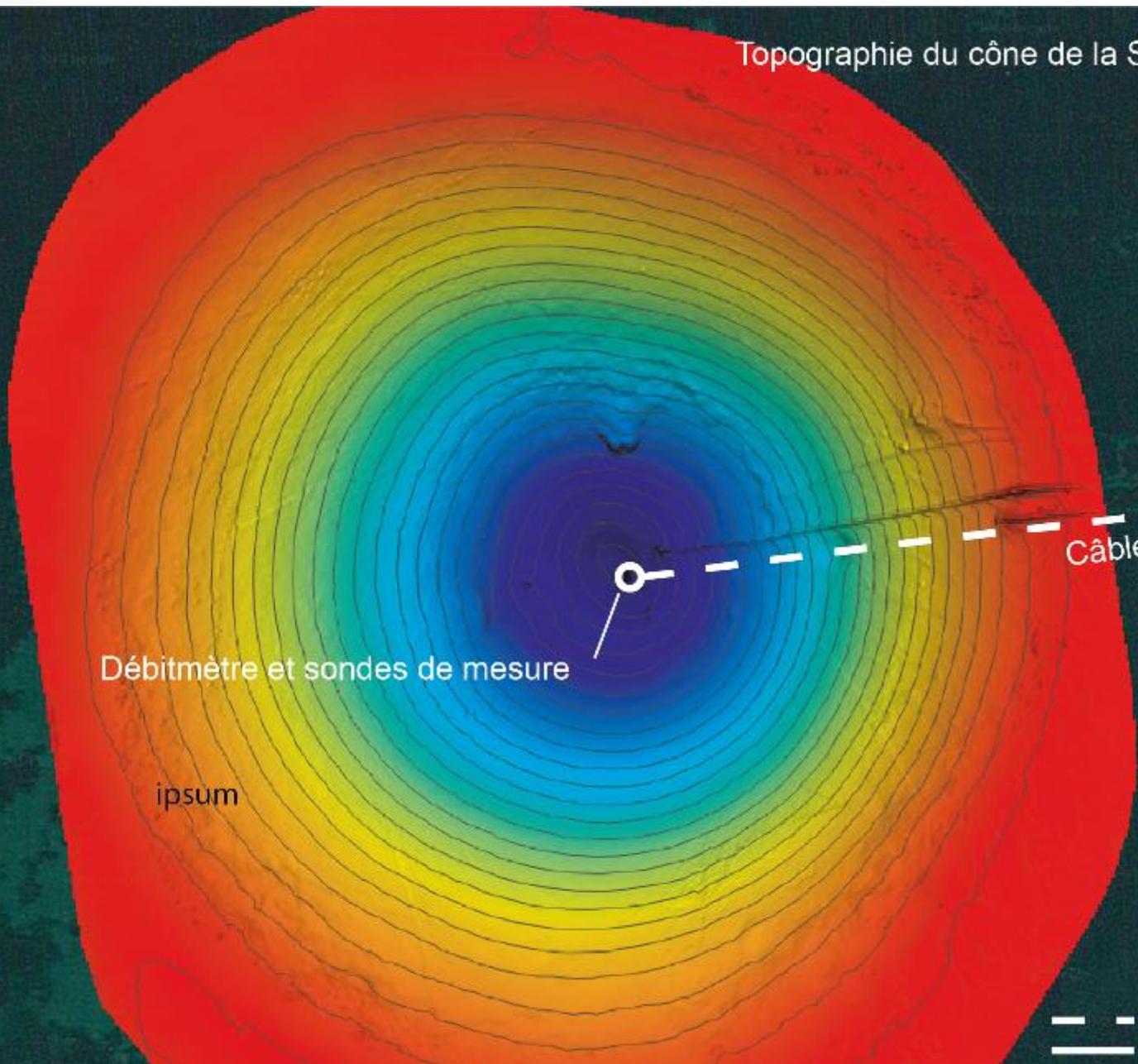


BRGM/RP-69163-FR



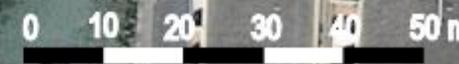
Topographie du cône de la Source de la Vise

BRGM/RP-69163-FR



Armoire de mesure et dispositif de pompage

— — canalisations sous marine ensouillées
— — canalisations terrestre enterrées

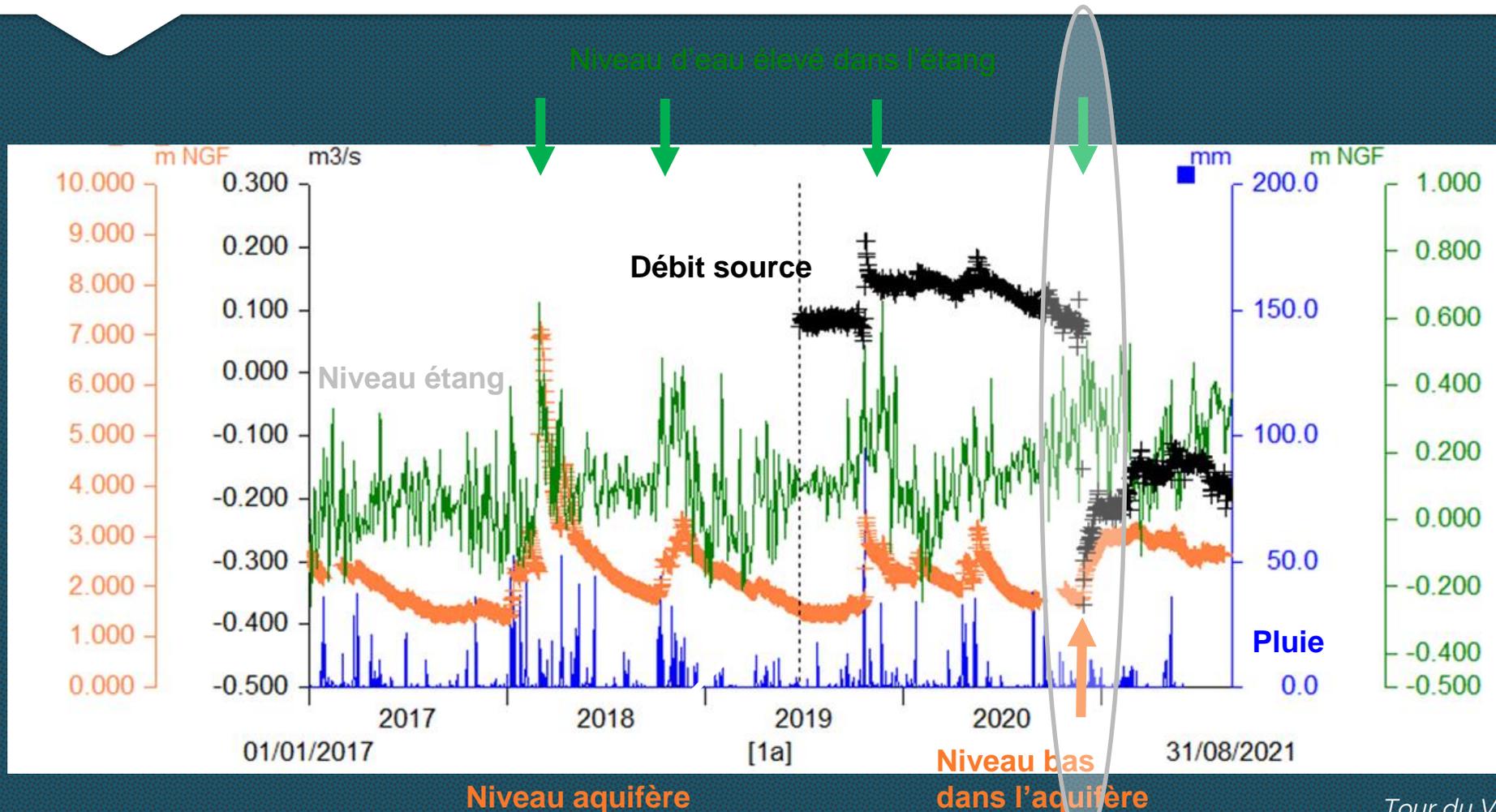


Tour du Valat 7 Février 2023

La lagune et son BV

Variabilité des apports karstiques

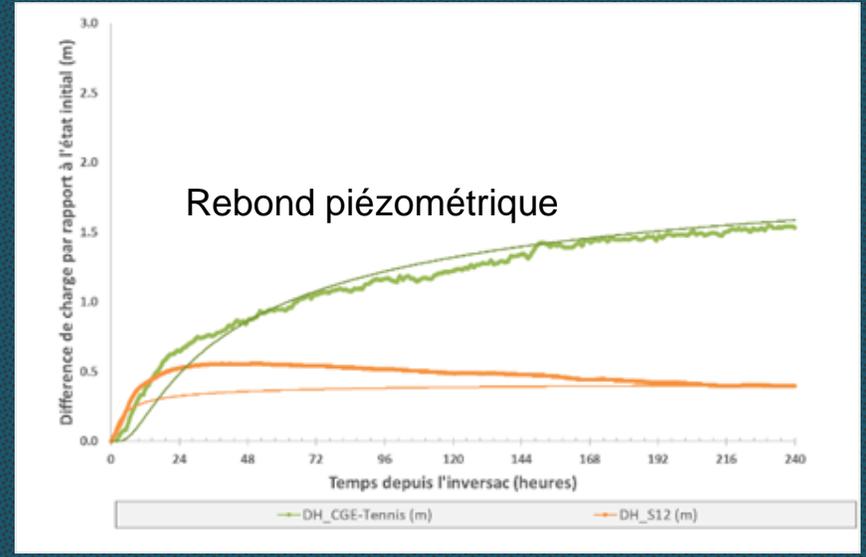
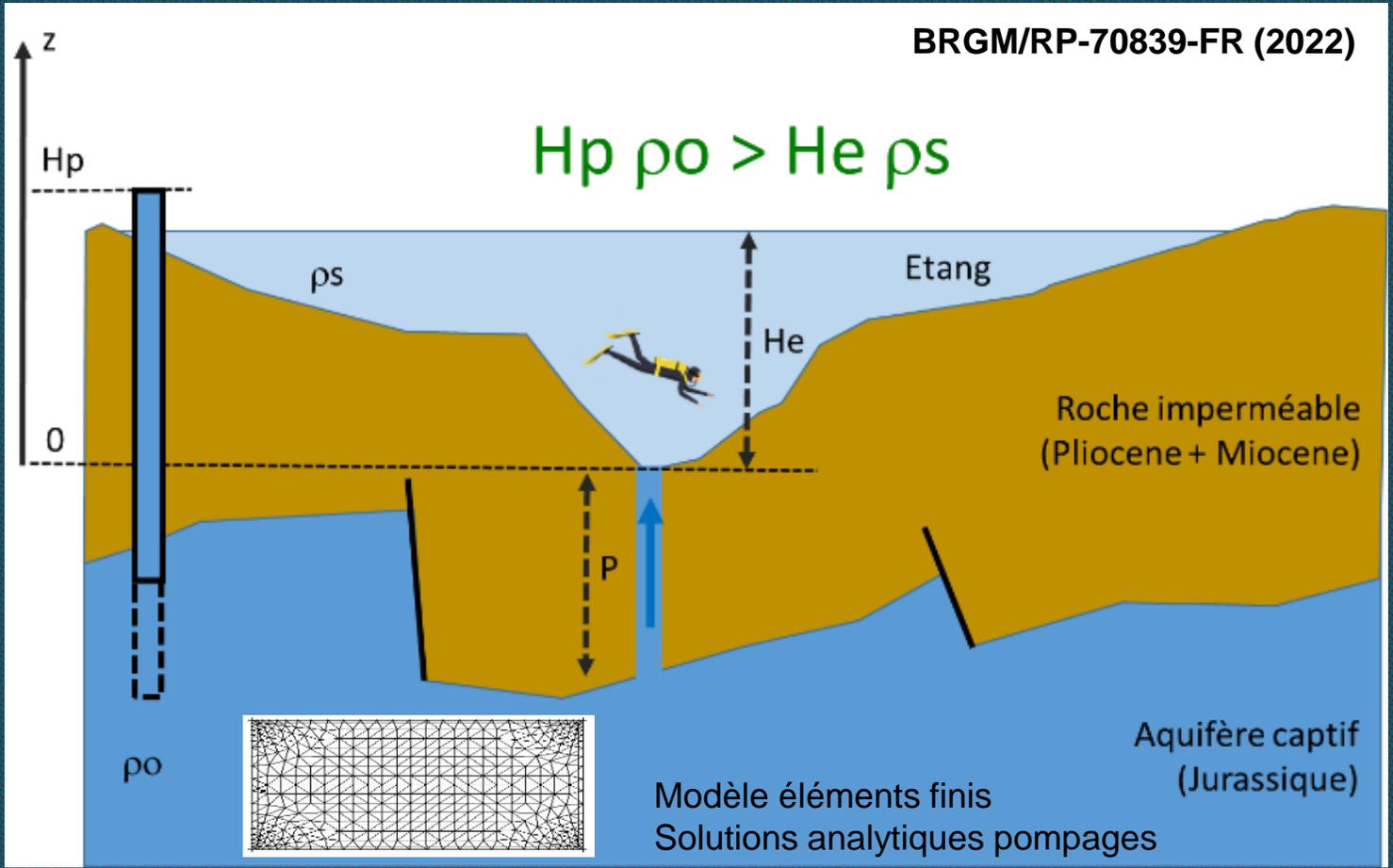
Cas particulier des inversacs de la lagune de Thau



La lagune et son BV

Variabilité des apports karstiques

Cas particulier des inversacs de la lagune de Thau



La lagune et son BV

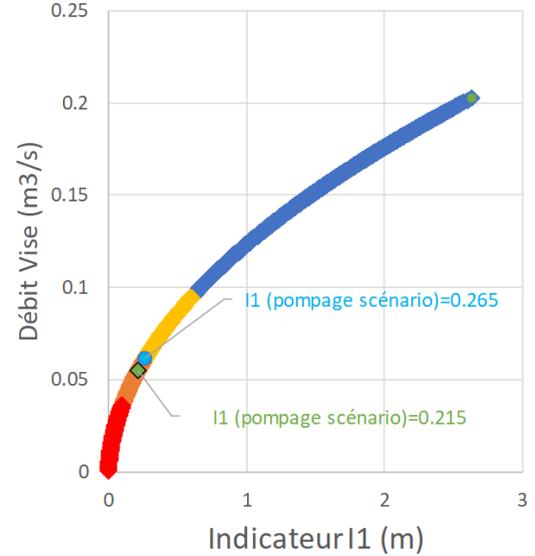
Variabilité des apports karstiques

Cas particulier des inversacs de la lagune de Thau : Outil de vigilance

Contexte "normal" de fonctionnement
Indicateur de déclenchement de l'Inversac

Critère "Actuel" :
I1[0.1;0.25] : **Vigilance renforcée**

Critère "Scenario" :
I1:[0.25;0.6] : **Vigilance**



Ratio de densité de seaux (Lagune/Karst) = 1.025

I1 > 0.6	: Pas de vigilance
I1 : [0.25; 0.6]	: Vigilance
I1 : [0.1; 0.25]	: Vigilance renforcée
I1 : [0; 0.1]	: Crise imminente d'inversac

Hpz (m NGF)	1.79	< >	Piézo à P4Balm
He (m NGF)	0.66	< >	Niveau de la Lagune
Salinité (PSU)	32	< >	Salinité de lagune à proximité de la Vise
T Lagune (°C)	8.8	< >	Température de lagune à proximité de la Vise
Régime de pompage actuel			
			rbt (m)
F5 (m3/h) =	5	< >	7.90E-03
F9 (m3/h) =	25	< >	3.95E-02
F14 (m3/h) =	10	< >	7.43E-03
F6 (m3/h) =	10	< >	1.21E-02
F8 (m3/h) =	25	< >	6.55E-03
S12 (m3/h) =	3	< >	1.63E-03
Cumul			
Q (m3/h) =	78		
Cumul			
Rbt (m)* =	0.08		
Débit Vise (m3/s) = 0.055			
Nouveau régime de pompage			
			rbt (m)
F5 (m3/h) =	3	< >	4.74E-03
F9 (m3/h) =	3	< >	4.74E-03
F14 (m3/h) =	5	< >	3.71E-03
F6 (m3/h) =	5	< >	6.07E-03
F8 (m3/h) =	20	< >	5.24E-03
S12 (m3/h) =	2	< >	1.08E-03
Q (m3/h) =	38		dQ (m3/h) = -40
Rbt (m)* =	0.03		2.56E-02
Indicateur (Scenario) = 0.265			
Débit Vise (m3/s) = 0.061			

BRGM/RP-70839-FR (2022)



Conclusion

Fonctionnement naturel de la lagune du point de vue hydro(géo)logique ?
↔ les apports par le BV sont-ils modifiés?

Grande diversité de fonctionnement hydrogéologique des lagunes

Identifier le type de formation aquifère

Comprendre sa structure et son fonctionnement

Préciser le contexte d'émergence des eaux sout. (échanges nappe-rivière, sources...)

Localiser les contributions d'eau sout.

Conclusion

Adapter la stratégie de suivi pour caractériser l'état ("naturel" ou modifié):

- Echelle de temps: Variabilité interannuelle, saisonnière, événementielle (crues)
- Echelle d'espace: Densité de points de suivis 2D et 3D, position des stations etc.
- Choix des paramètres (bilan de masse, indicateurs) et raisonner en flux ($Q \cdot C$)

Conclure sur les tendances observées du point de vue quantitatif

Prendre en compte les temps de transfert souterrain pour la qualité

=> datation des eaux

Ex. Analyser les stratégies de reconquête de la qualité de l'eau vis-à-vis des pollutions diffuses