



LA DYNAMIQUE DES ÉCOULEMENTS D'AIR ET D'EAU DANS UN MASSIF CARBONATÉ KARSTIQUE CÔTIER ET IMPACT SUR L'ALTÉRATION DES PAROIS : APPLICATION À LA GROTTE COSQUER ET L'ÉTAT DE CONSERVATION DE SES PAROIS ET DE SES ŒUVRES

Hugo PELLET, Stéphanie TOURON,
Pierre HENRY, Bruno ARFIB



Fréquentation humaine des milieux souterrains

2

Contexte

Grotte de Bruniquel : 176 500 ans



Photo : CNRS

Grotte Chauvet : 36 000 ans



Photo : LRMH

Grotte de Lascaux : 23 000 ans

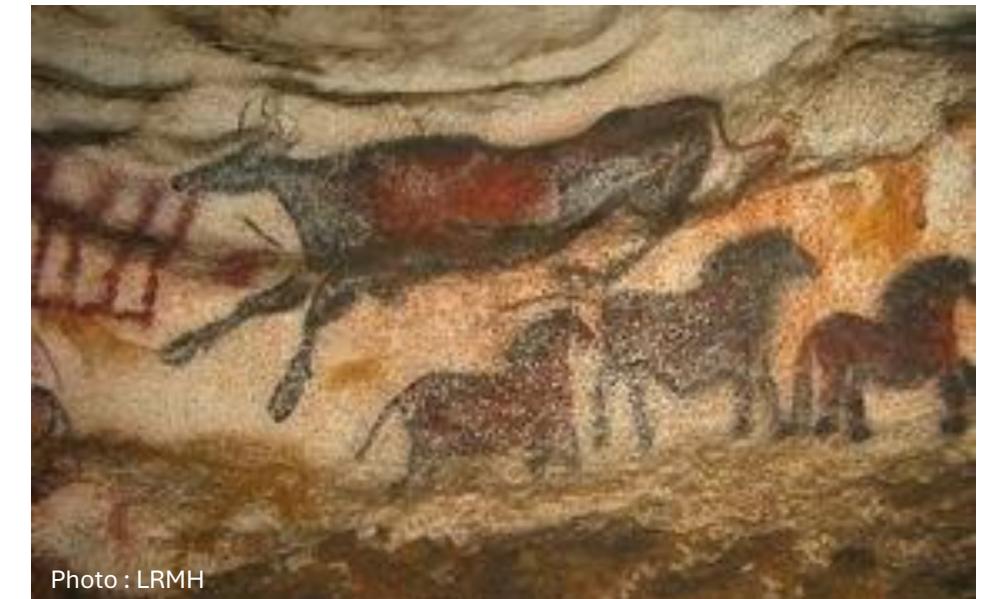


Photo : LRMH

Grotte du Pech-Merle : 16 000 ans

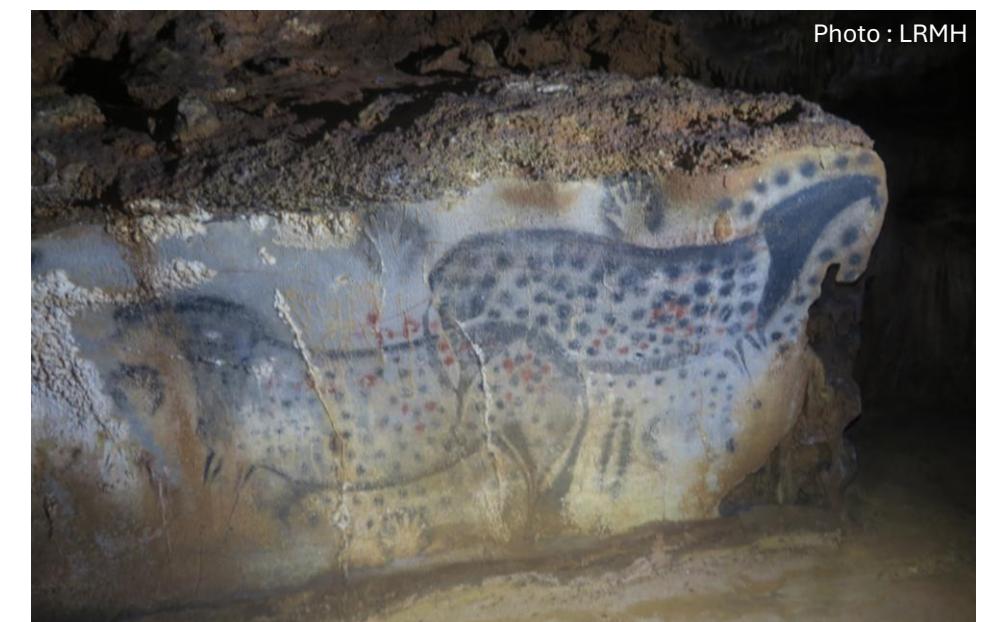


Photo : LRMH

Contexte



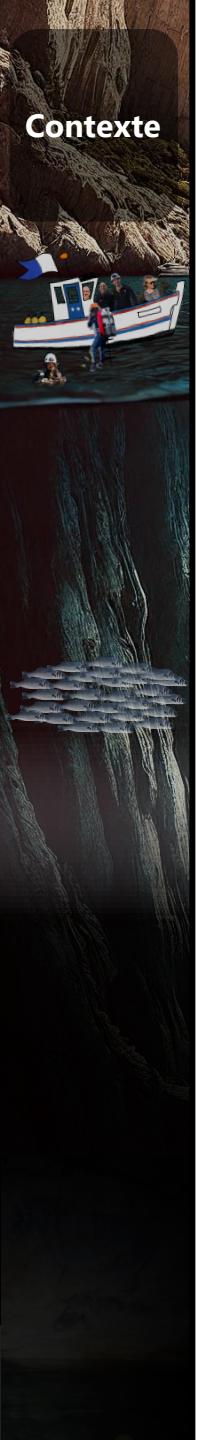
Massif des Calanques

Karst : paysage formé par la dissolution de roches solubles

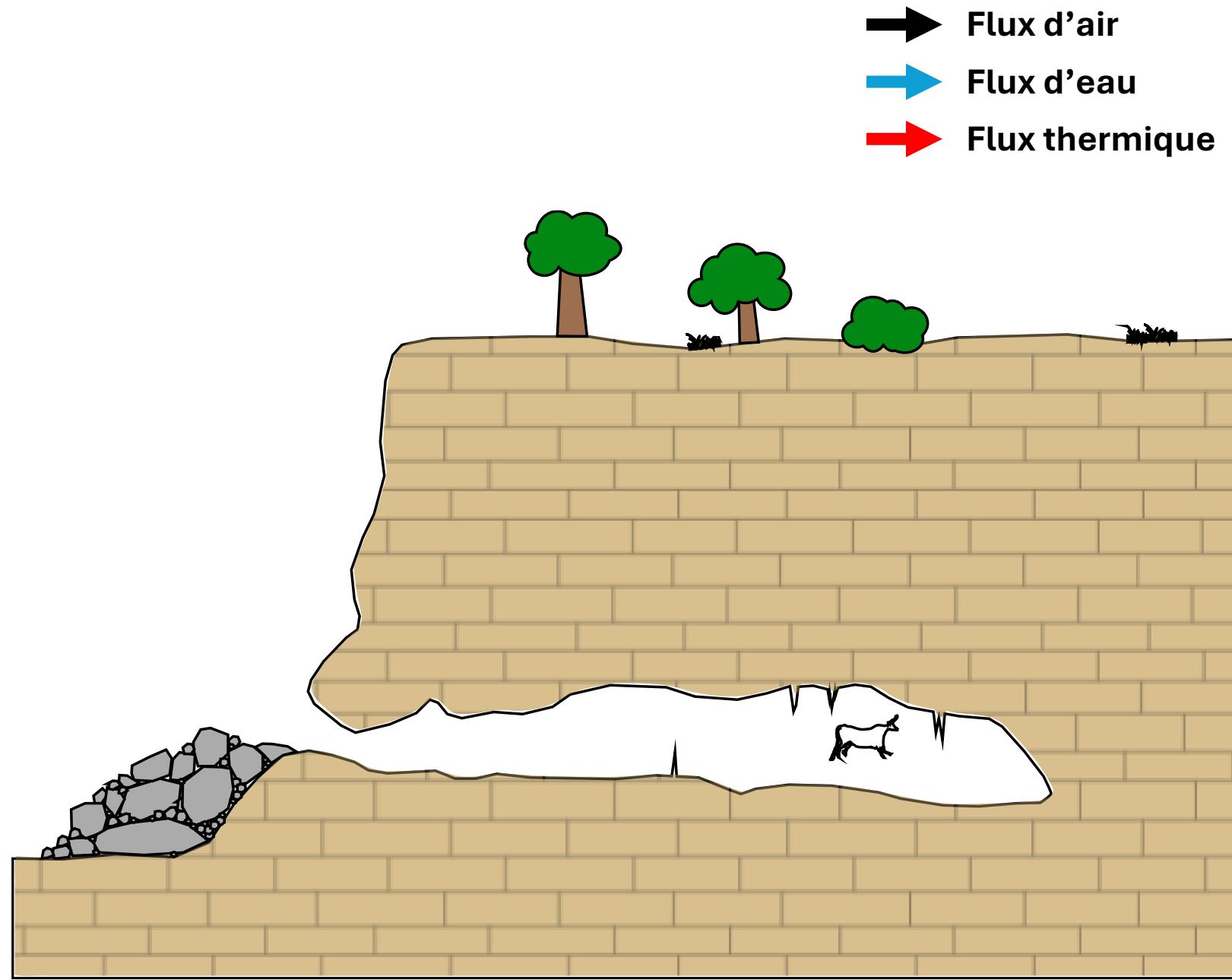


Les grottes : échanges avec leur environnement

4



Contexte



- Flux d'air
- Flux d'eau
- Flux thermique

Les grottes : échanges avec leur environnement

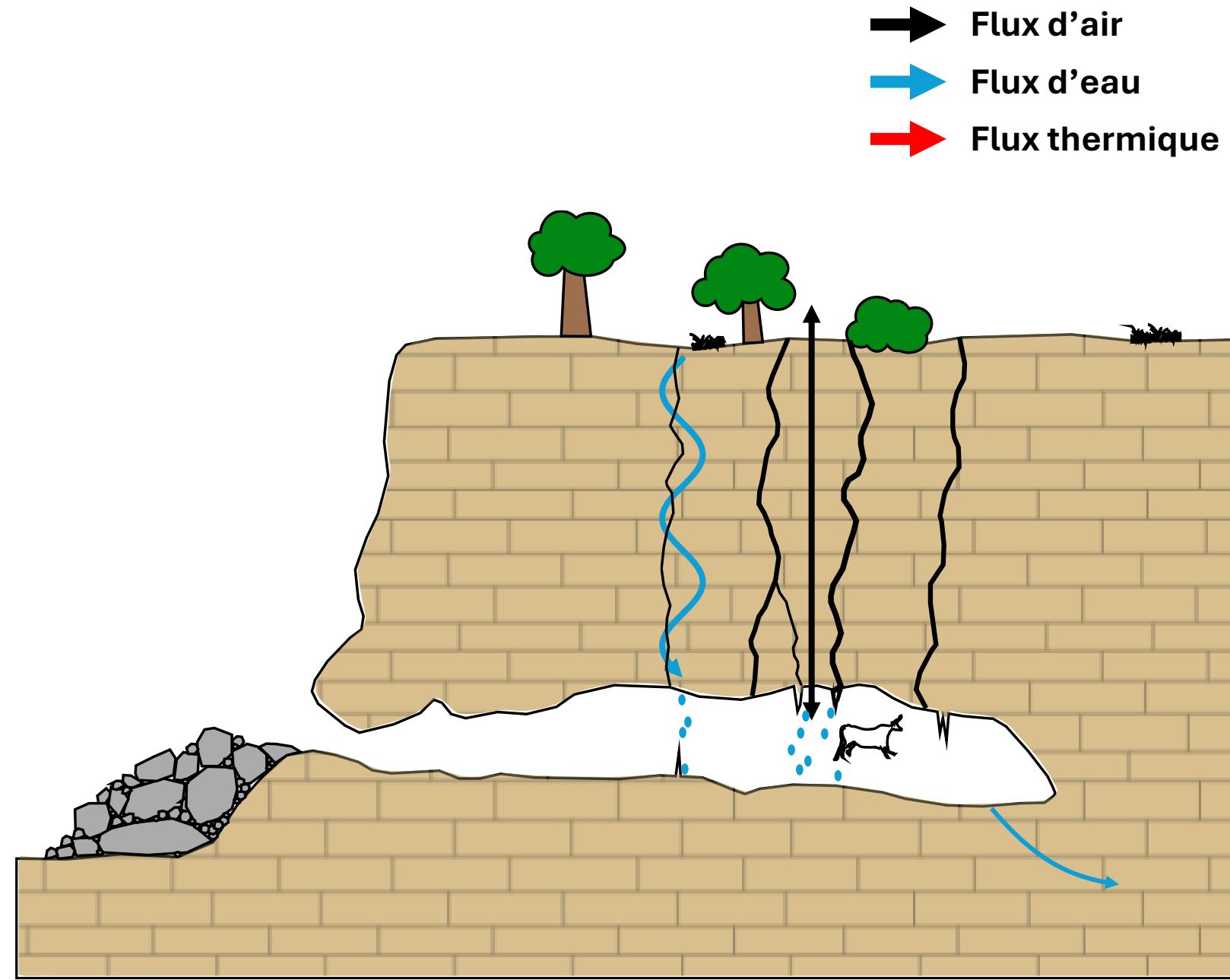
5



Contexte

Massif carbonaté karstique

- Porosité
- Perméabilité



Les grottes : échanges avec leur environnement

6



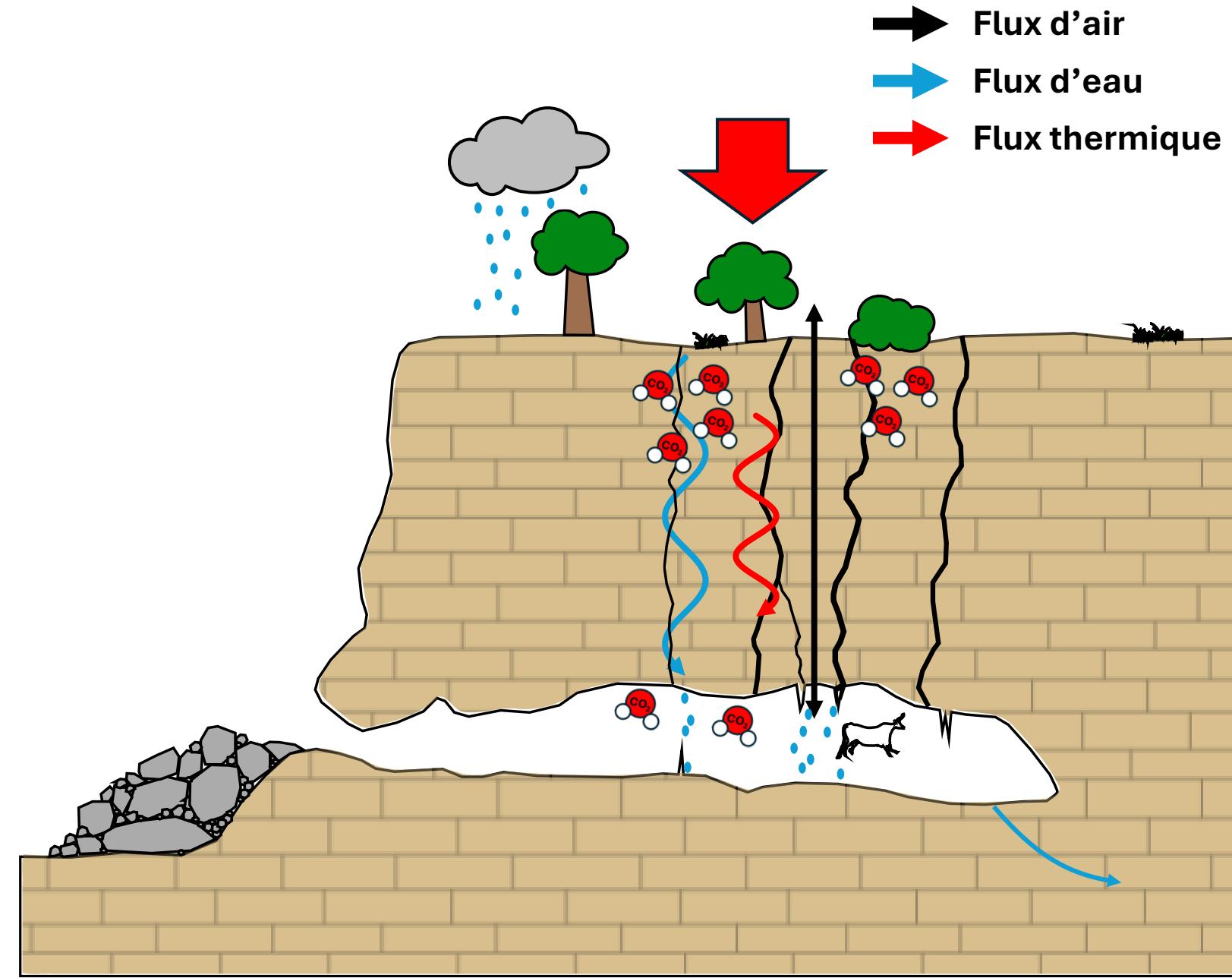
Contexte

Massif carbonaté karstique

- Porosité
- Perméabilité

Environnement extérieur

- Végétation
- Climat



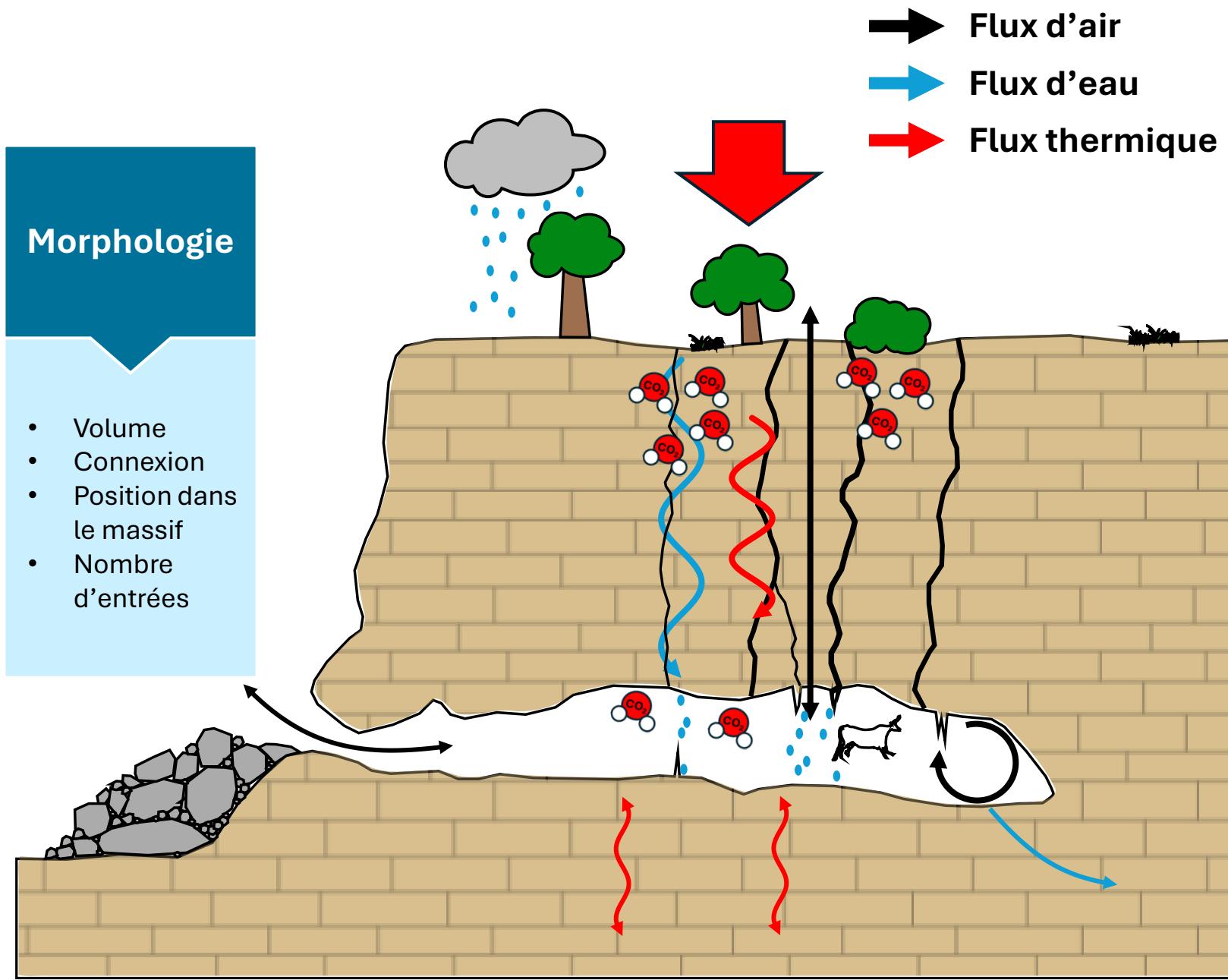
Les grottes : échanges avec leur environnement

7



Contexte

Massif carbonaté karstique	Environnement extérieur	Morphologie
<ul style="list-style-type: none">• Porosité• Perméabilité	<ul style="list-style-type: none">• Végétation• Climat	<ul style="list-style-type: none">• Volume• Connexion• Position dans le massif• Nombre d'entrées



Les grottes : échanges avec leur environnement

8



Contexte

Massif carbonaté karstique

- Porosité
- Perméabilité

Environnement extérieur

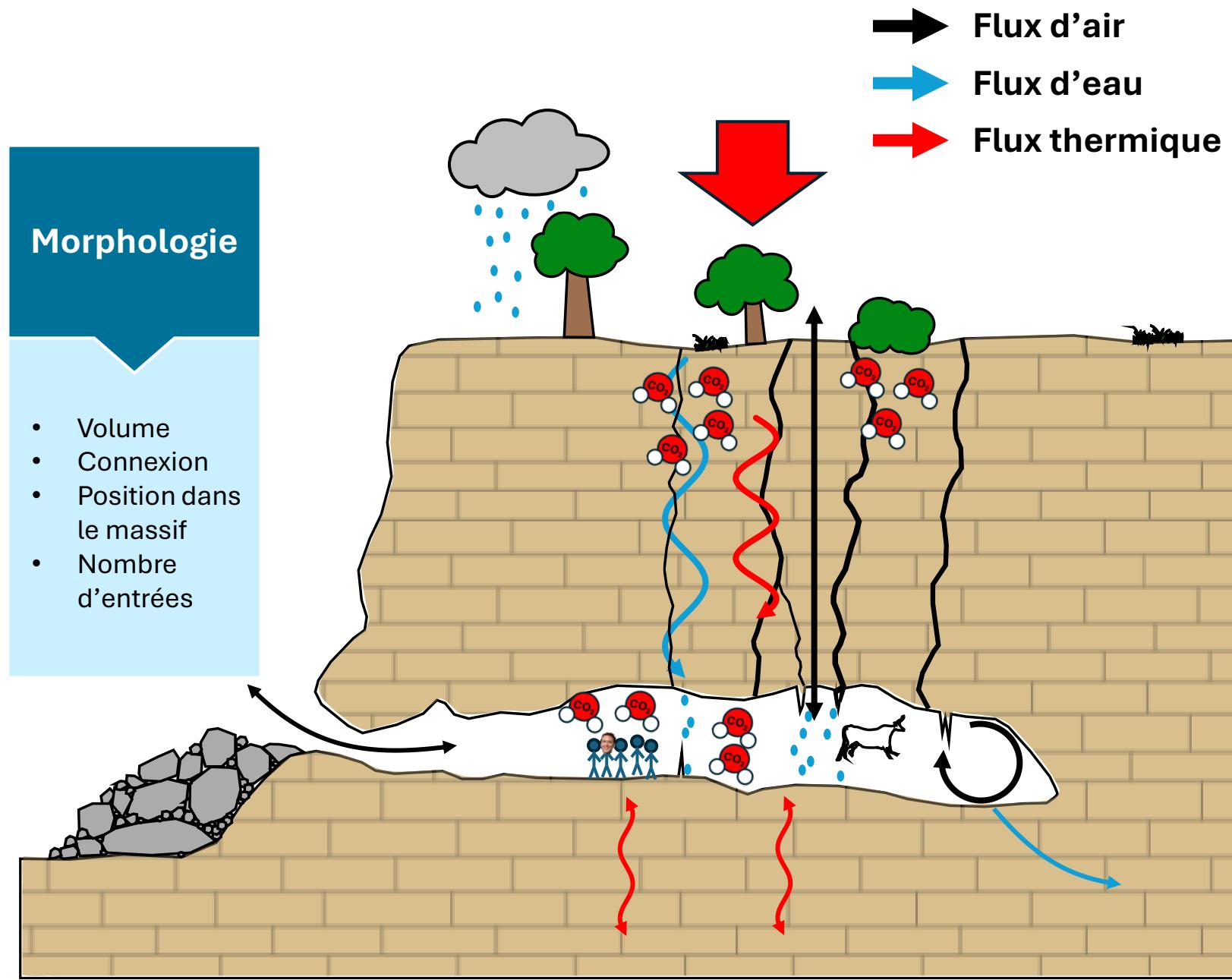
- Végétation
- Climat

Morphologie

- Volume
- Connexion
- Position dans le massif
- Nombre d'entrées

Son utilisation

- Grotte touristique ?
- Limitée aux scientifiques ?



Contexte

Fonctionnement hydroclimatique

Massif carbonaté karstique

- Porosité
- Perméabilité

Environnement extérieur

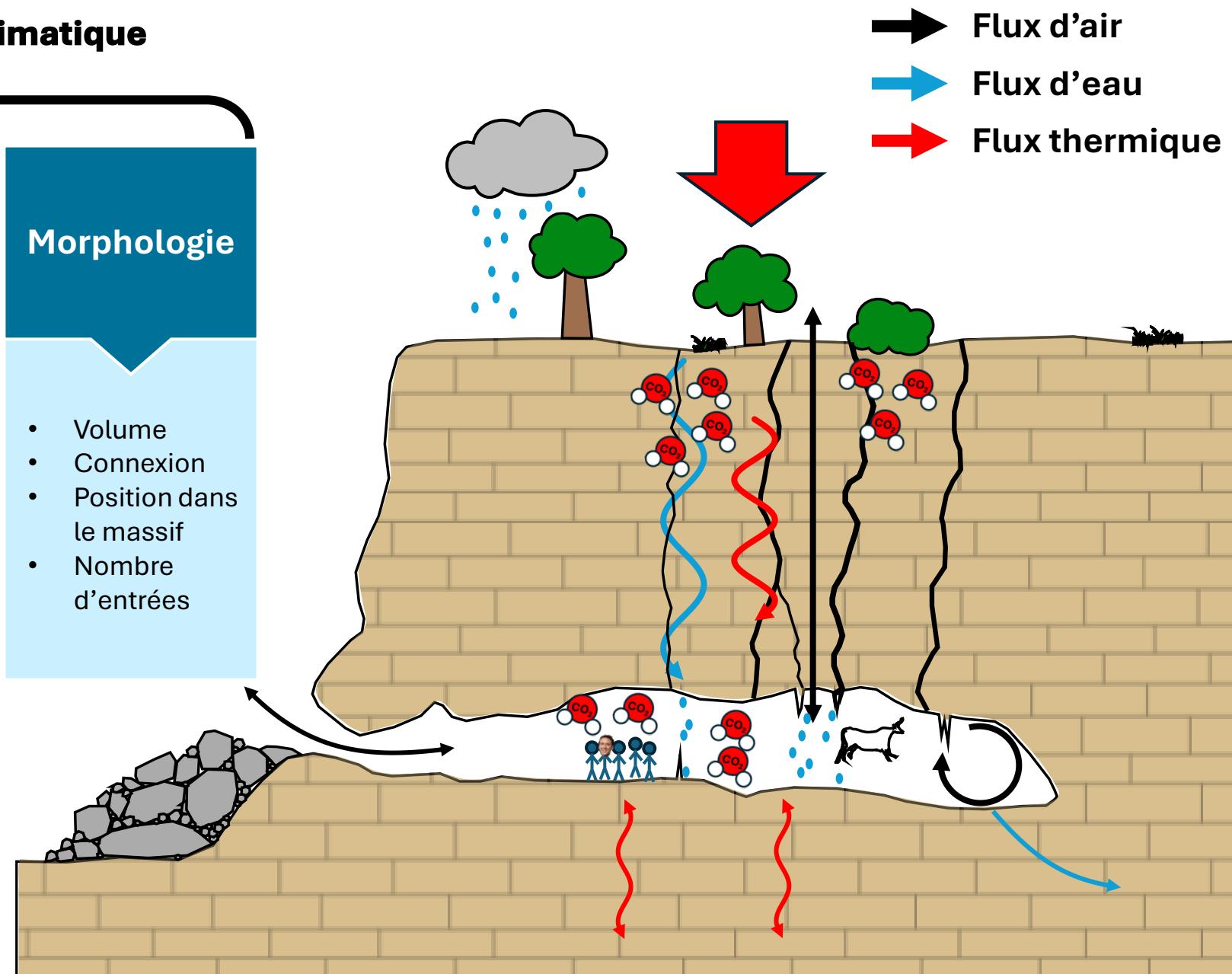
- Végétation
- Climat

Morphologie

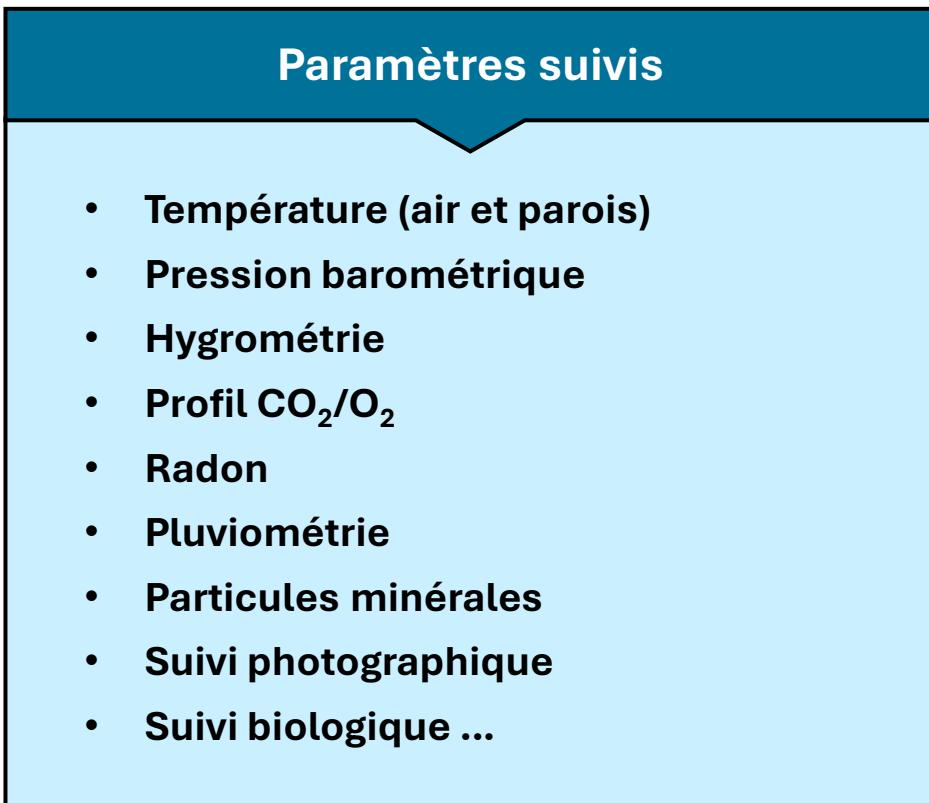
- Volume
- Connexion
- Position dans le massif
- Nombre d'entrées

Son utilisation

- Grotte touristique ?
- Limitée aux scientifiques ?



Contexte



Ponctuel



Continu



Bourges *et al.* 2020

Frouin et Touron 2022

Saez *et al.* 2021

Leplat *et al.* 2019

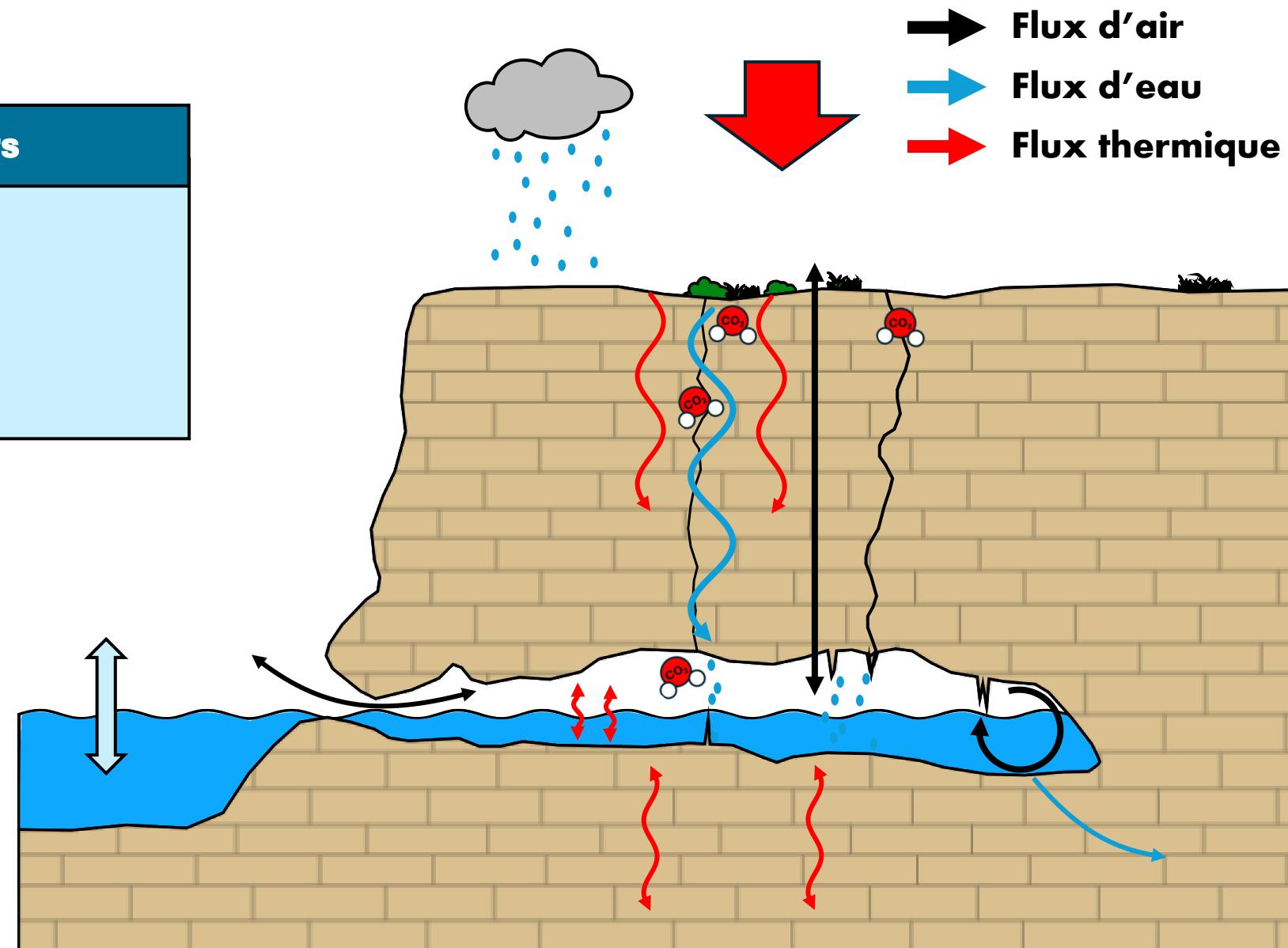
Stabilité des paramètres = bonne conservation
→ Équilibre fragile avec l'environnement proche

Problème du changement climatique rapide ?

Contexte

Cas des karst côtiers

- Niveau marin
- Eau saumâtre
- Échanges thermiques



Cas d'étude : grotte Cosquer

Cas
d'étude



Photo : S. Touron



- Fortes variations des plans d'eau au cours de l'année
- Lessivage des parois, des œuvres et des sols archéologiques



Photo : C. Montoya

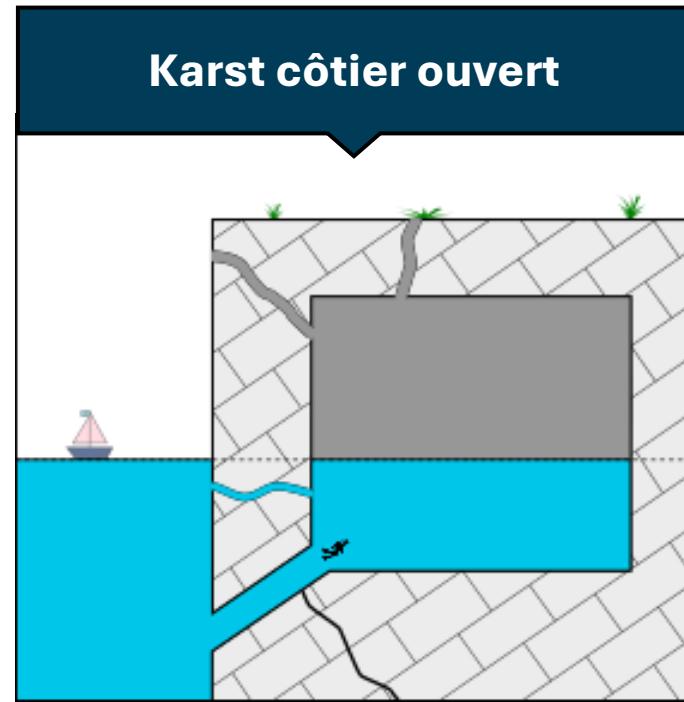
- Problèmes similaires aux autres grottes
- Connectée à la mer : variations du niveau marin

→ Connaître et comprendre le fonctionnement hydroclimatique actuel d'une grotte ornée semi-noyée.

→ Quel avenir pour ce type de grotte avec le changement climatique ?

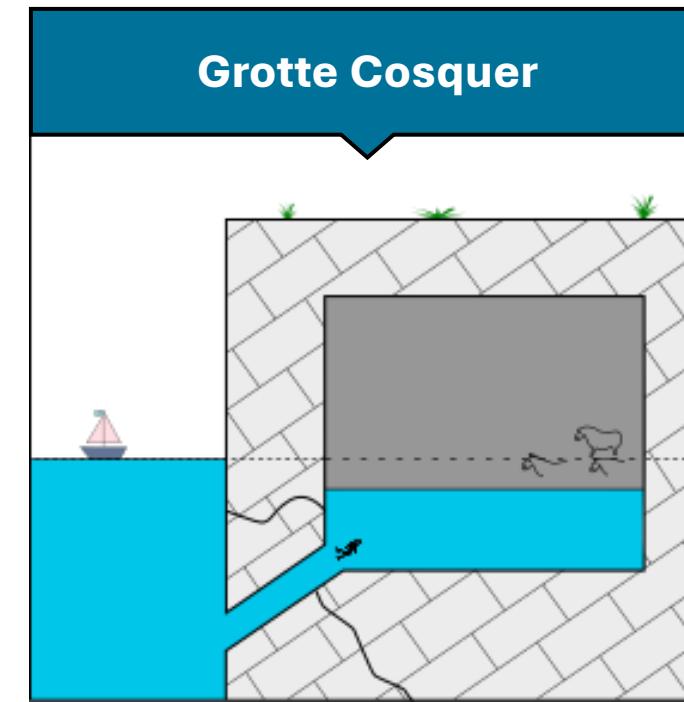


Karst côtier ouvert



Niveau d'eau = Niveau mer

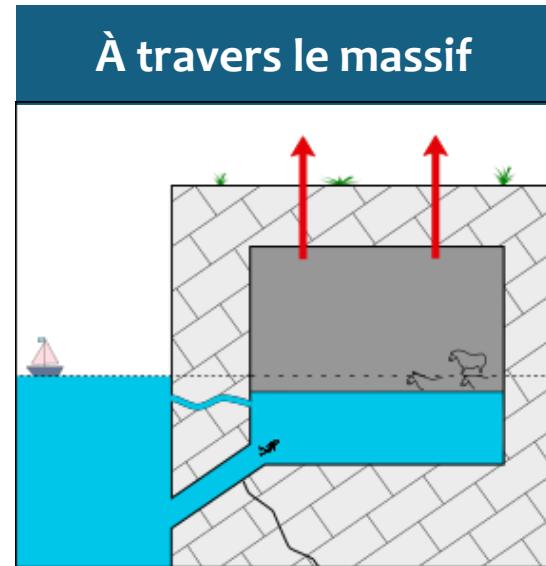
Grotte Cosquer



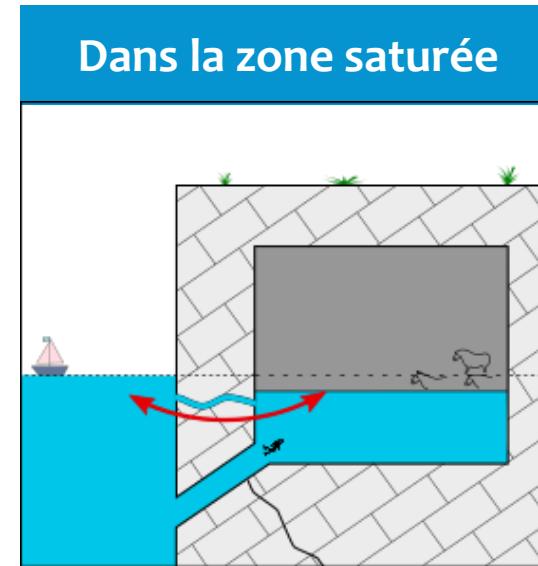
Niveau d'eau < Niveau mer

Objectifs : modéliser les écoulements d'air et d'eau dans l'hydrosystème karstique côtier de la grotte Cosquer

→ 3 axes de travail



Pellet et al. 2024, HESS



Pellet et al.
(accepté le 02/12/25, STOTEN)



Cas d'étude : grotte Cosquer

16

Cas
d'étude



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Europe_blank_map.png

Parc National des Calanques

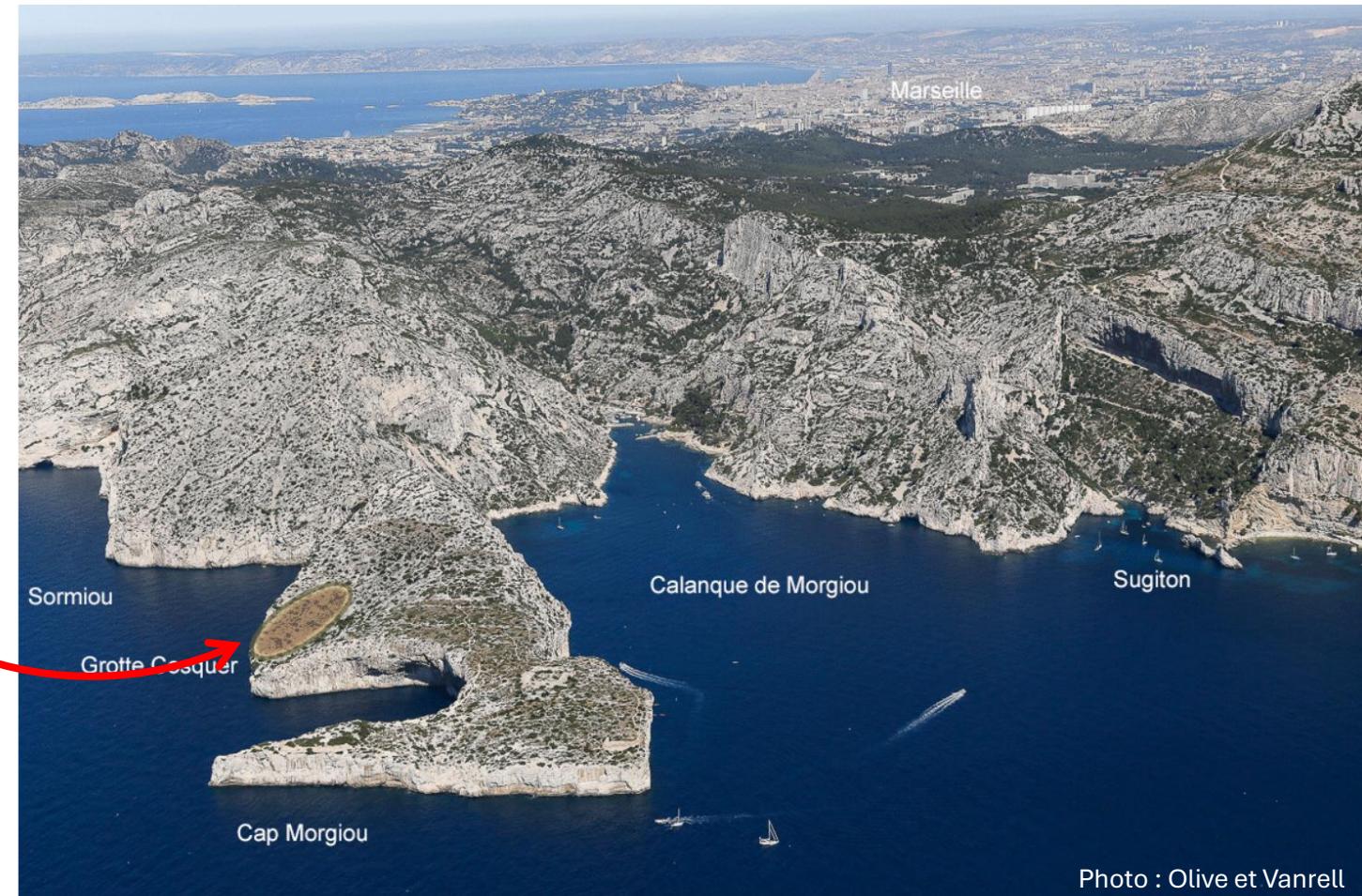
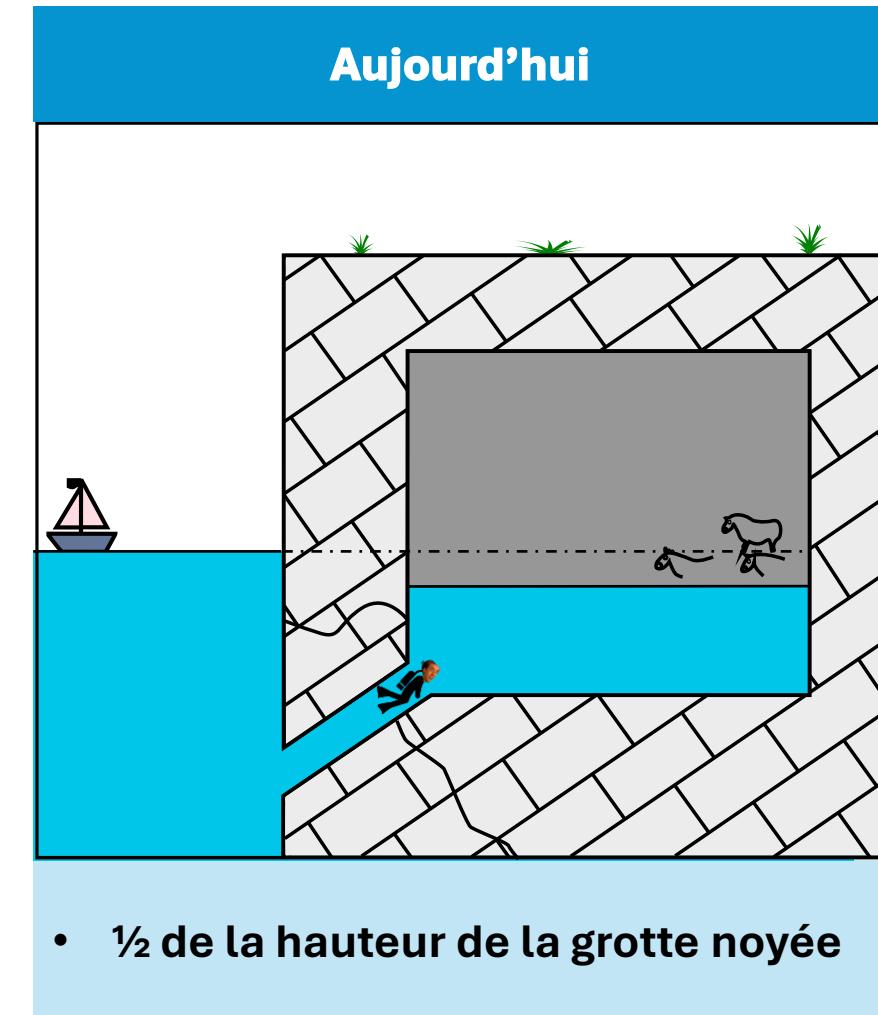
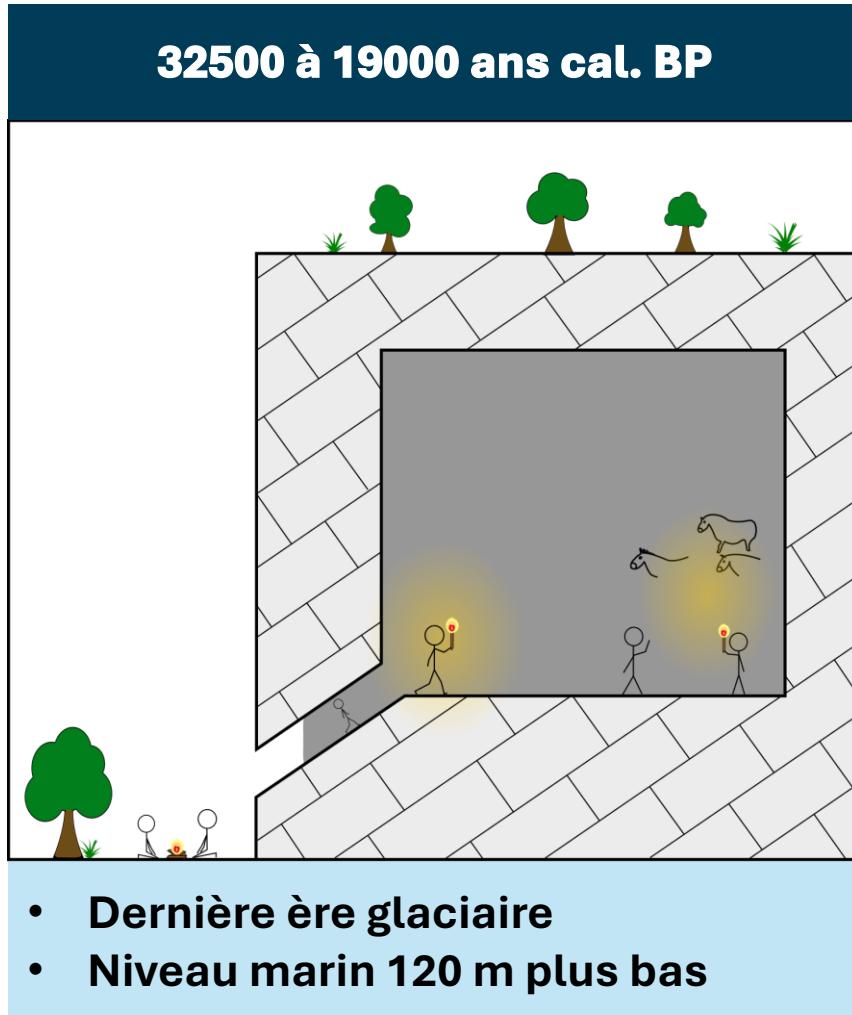


Photo : Olive et Vanrell

Cas d'étude : grotte Cosquer

17

Cas
d'étude



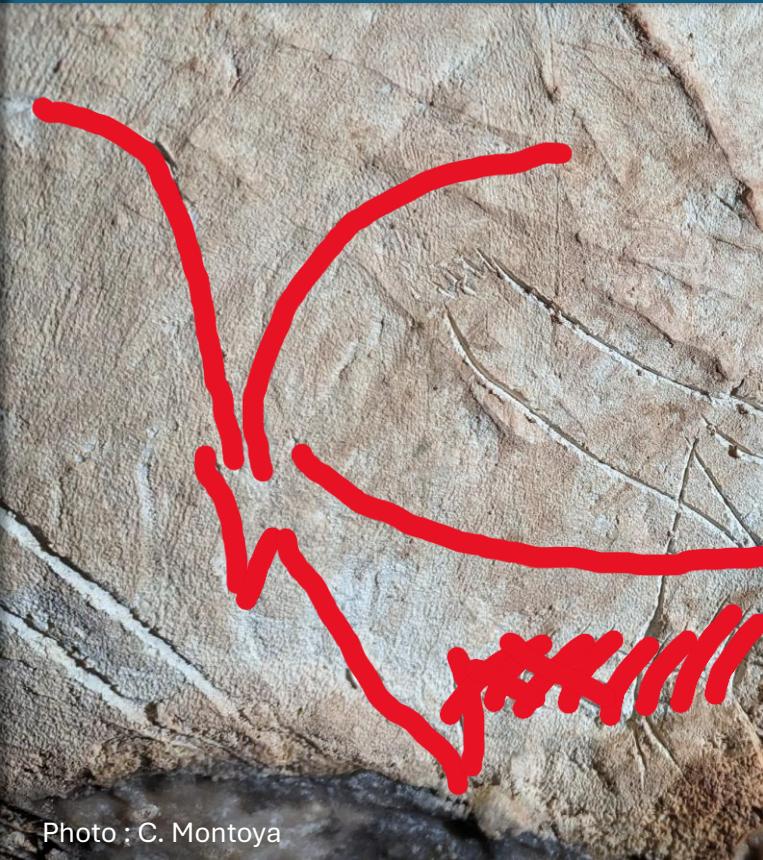


Thèmes classiques de l'art paléolithique

Mégacéros



Chamois



Chevaux

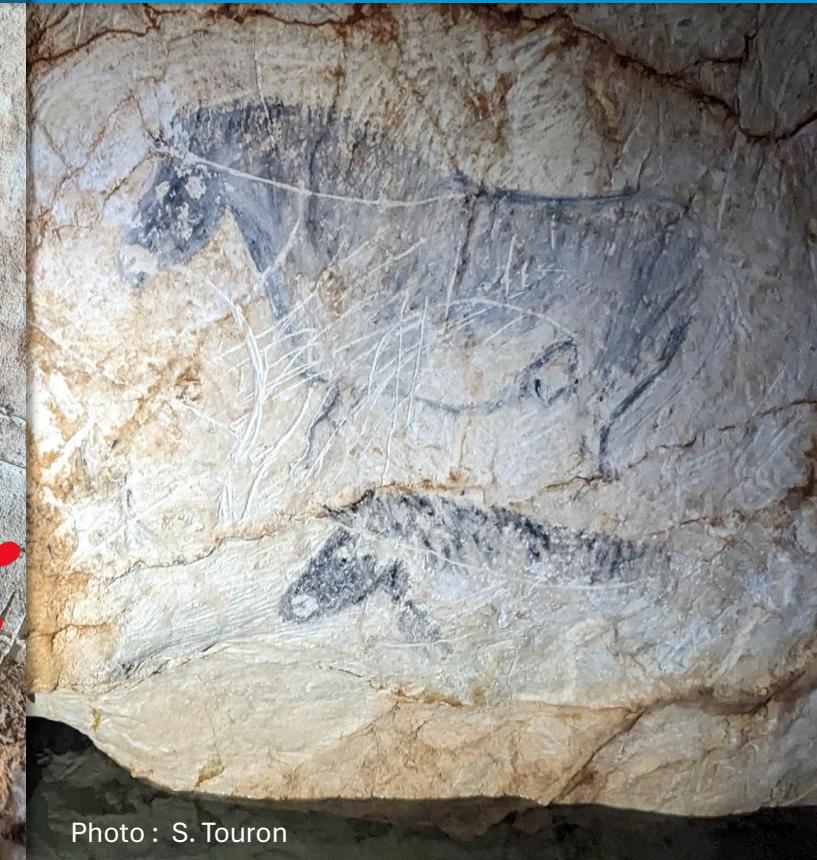


Photo : C. Montoya

Photo : C. Montoya

Photo : S. Touron



Thèmes rares dans l'art paléolithique

Phoques



Pingouins



Méduses



Photo : L. Vanrell

Photo : S. Touron

Photo : S. Touron

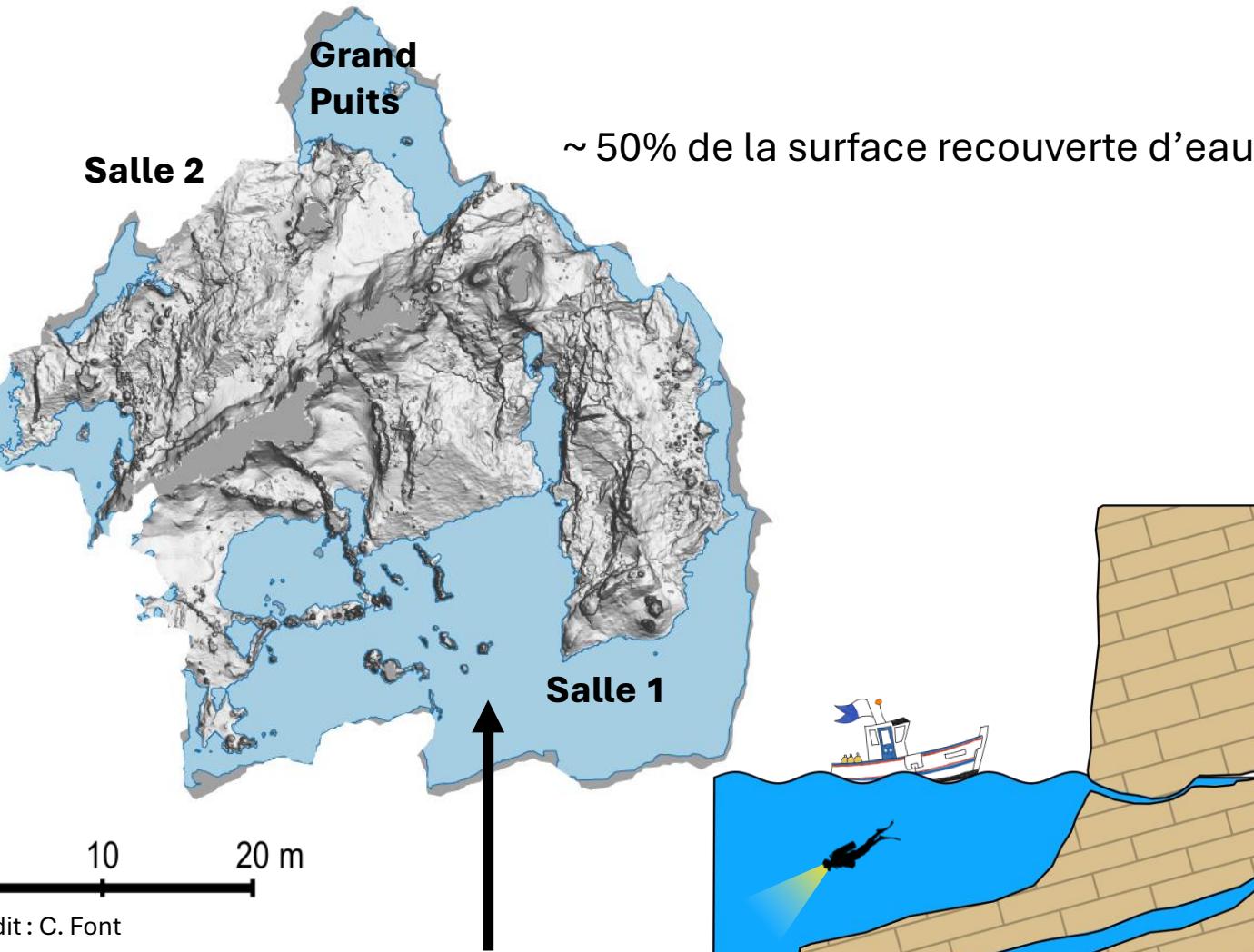
Cas d'étude : grotte Cosquer

20

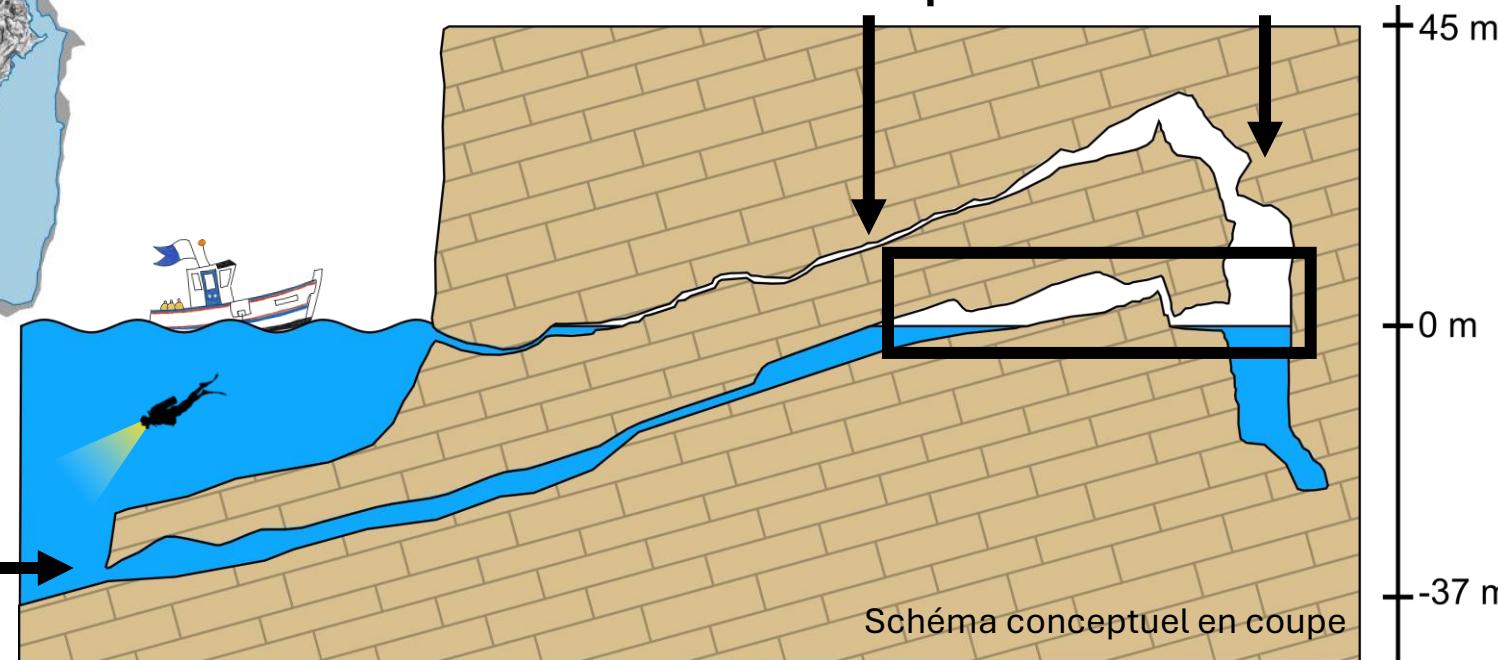


N

Vue du dessus



Conduit supérieur Grand Puits



Face ouest du cap Morgiou

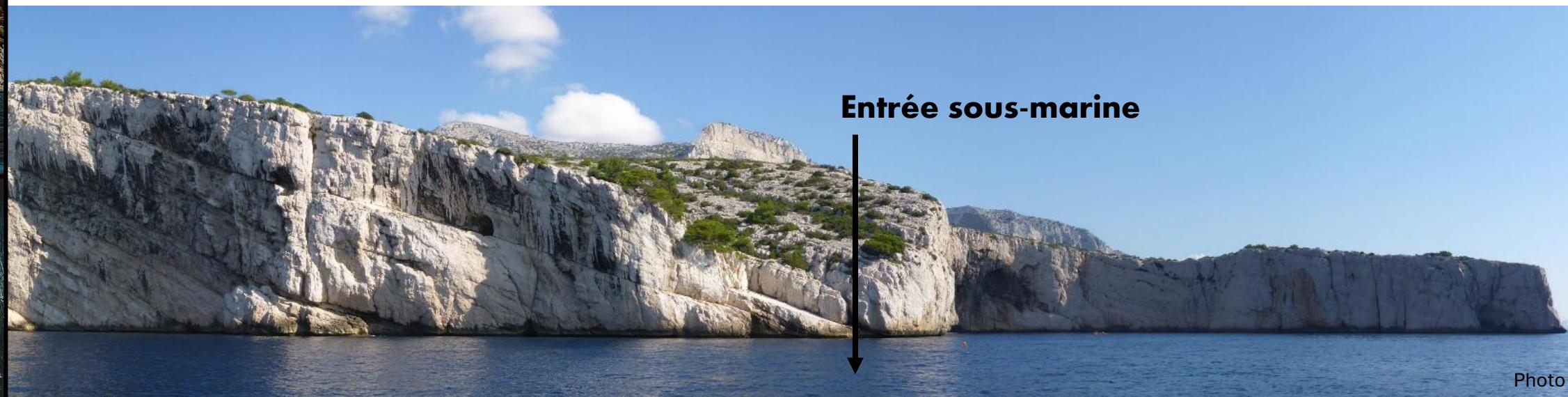


Photo : B. Arfib

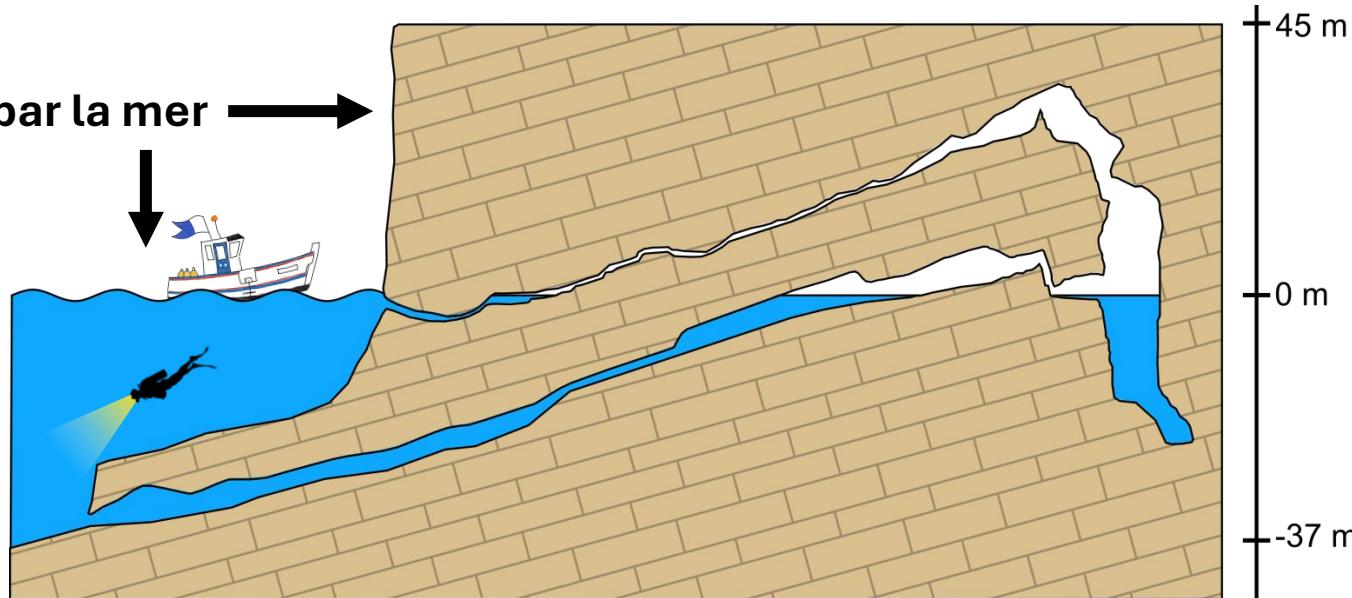
- Calcaire urgonien
 - Très peu poreux
 - Fractures colmatées (argile et calcite)
 - Pas d'ouverture au-dessus de la mer
- } Massif peu perméable



Face ouest du cap Morgiou



Isolée de l'extérieur par le massif et par la mer →



Données du suivi hydroclimatique

Cas d'étude

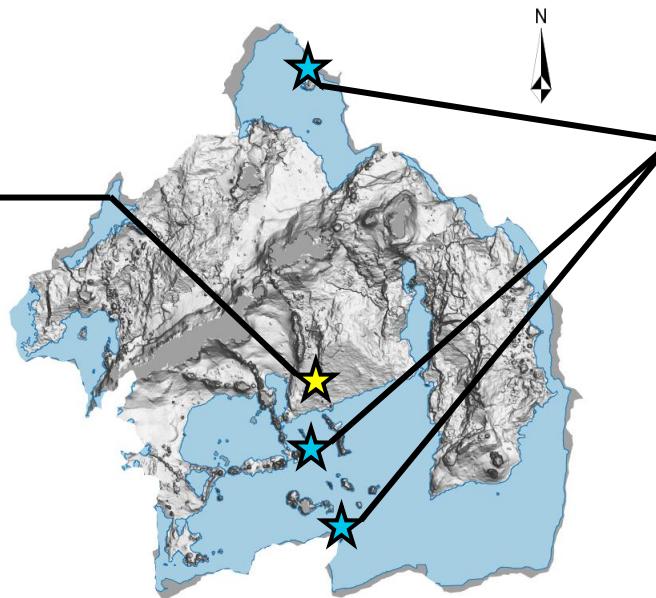
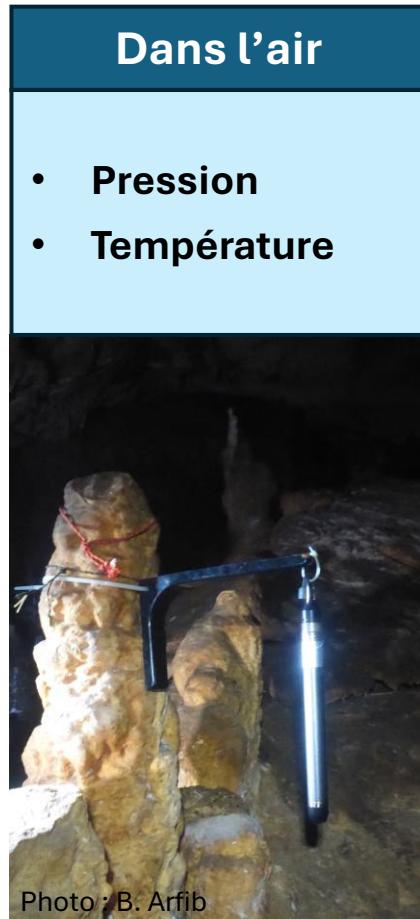


Matériel et données



Depuis 2014 (10 ans de données)

Fréquence d'acquisition : 5 min



Dans l'eau

- Pression
- Température
- Conductivité électrique



Colonne d'eau au-dessus de la sonde

$$H_{\text{eau}} = \frac{P_{\text{eau}} - P_{\text{air}}}{\rho_{\text{mer}} g}$$

→ Variation niveau d'eau dans la grotte

Données externes : données océanographiques et météorologiques

24

Cas d'étude



Matériel et données



Marégraphe d'Endoume

- Hauteur de la mer

Depuis 1850

Fréquence : 10 min



SNO Karst de Port-Miou

- Pression atmosphérique
- Pression dans l'eau

Depuis 2014

Fréquence : 5 min

Météo-France

- Données météorologiques

Depuis 1991

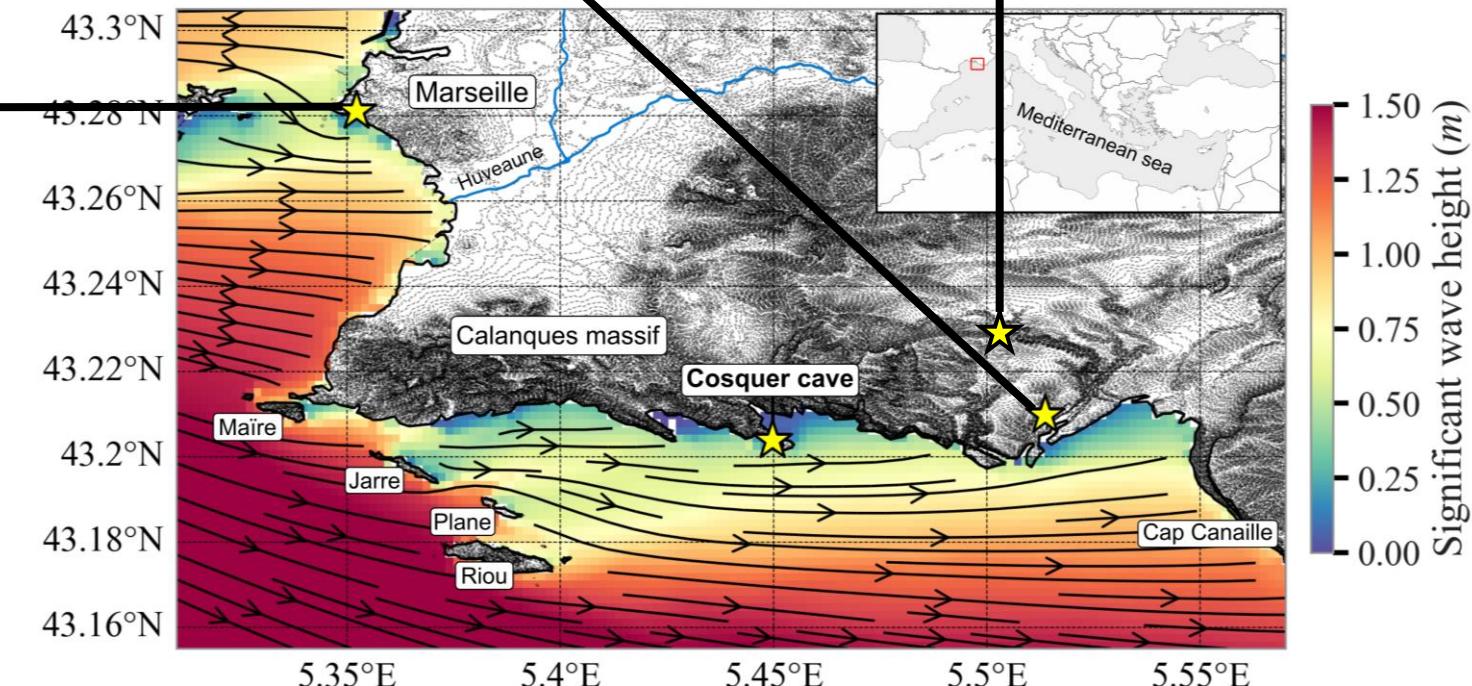
Fréquence : variable

Simulation numérique du SHOM

- Directions des vagues
- Hauteurs des vagues
- Périodes des vagues

De 2015 à 2023

Fréquence : 3h



Fonctionnement hydroclimatique

25

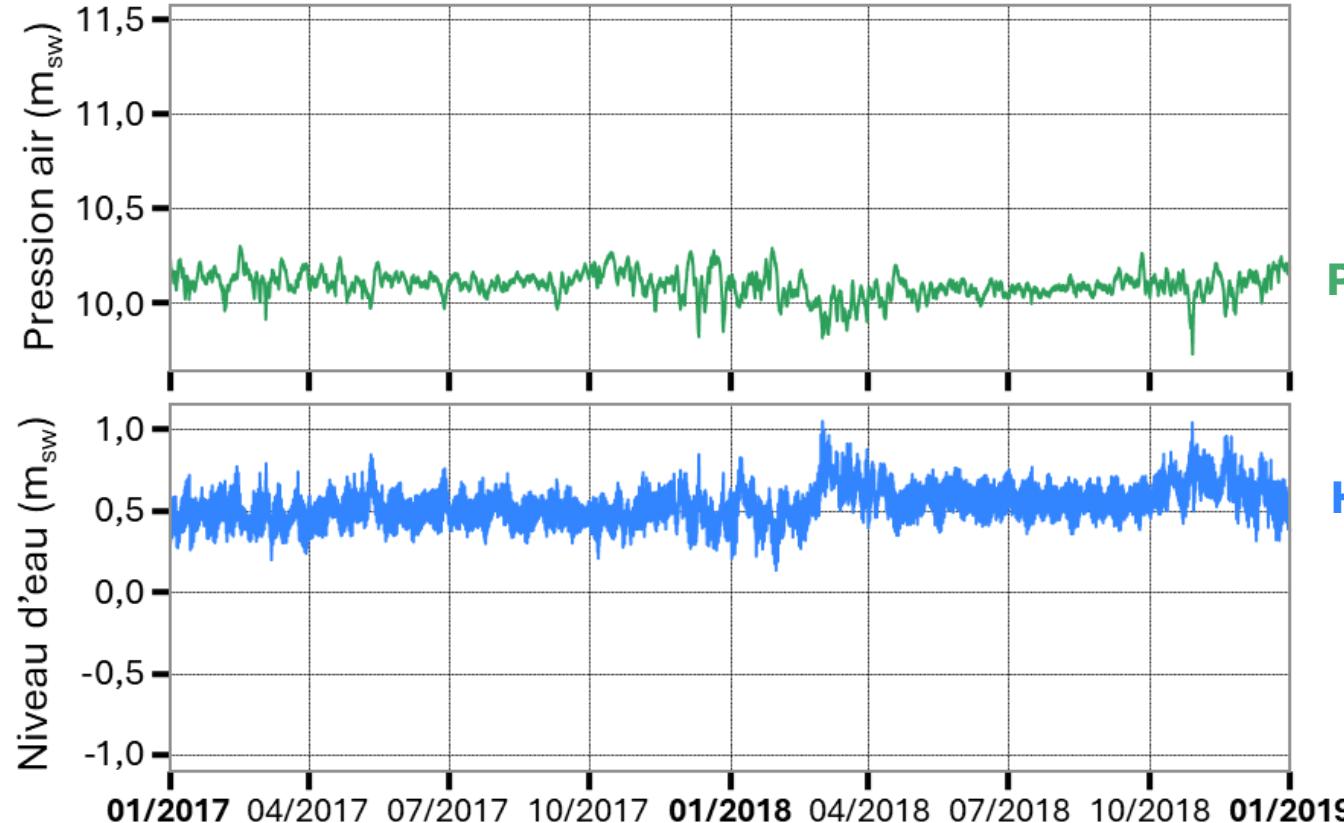
Cas d'étude



Matériel et données

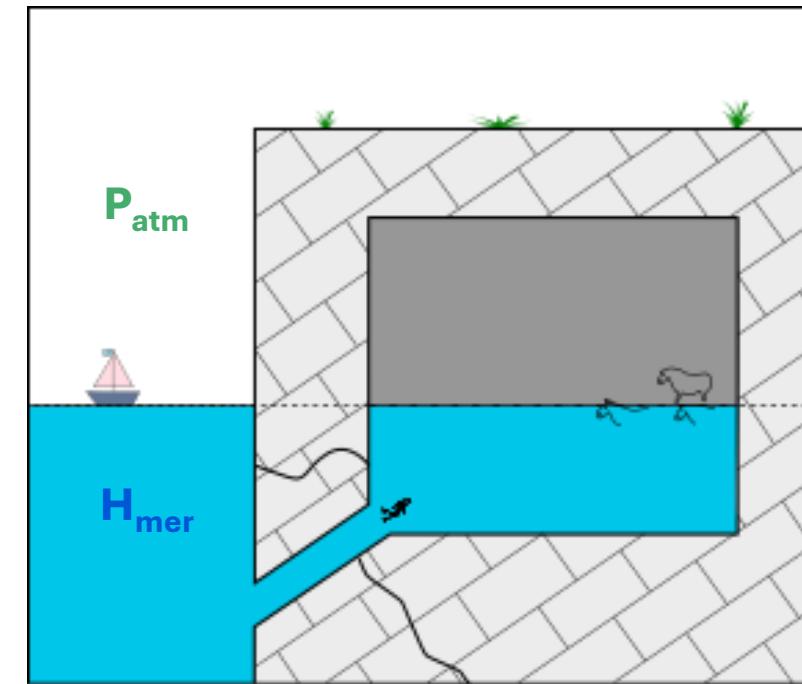
1 Hydroclim et perméa

Données de 2014 à 2024



P_{atm}

H_{mer}



Fonctionnement hydroclimatique

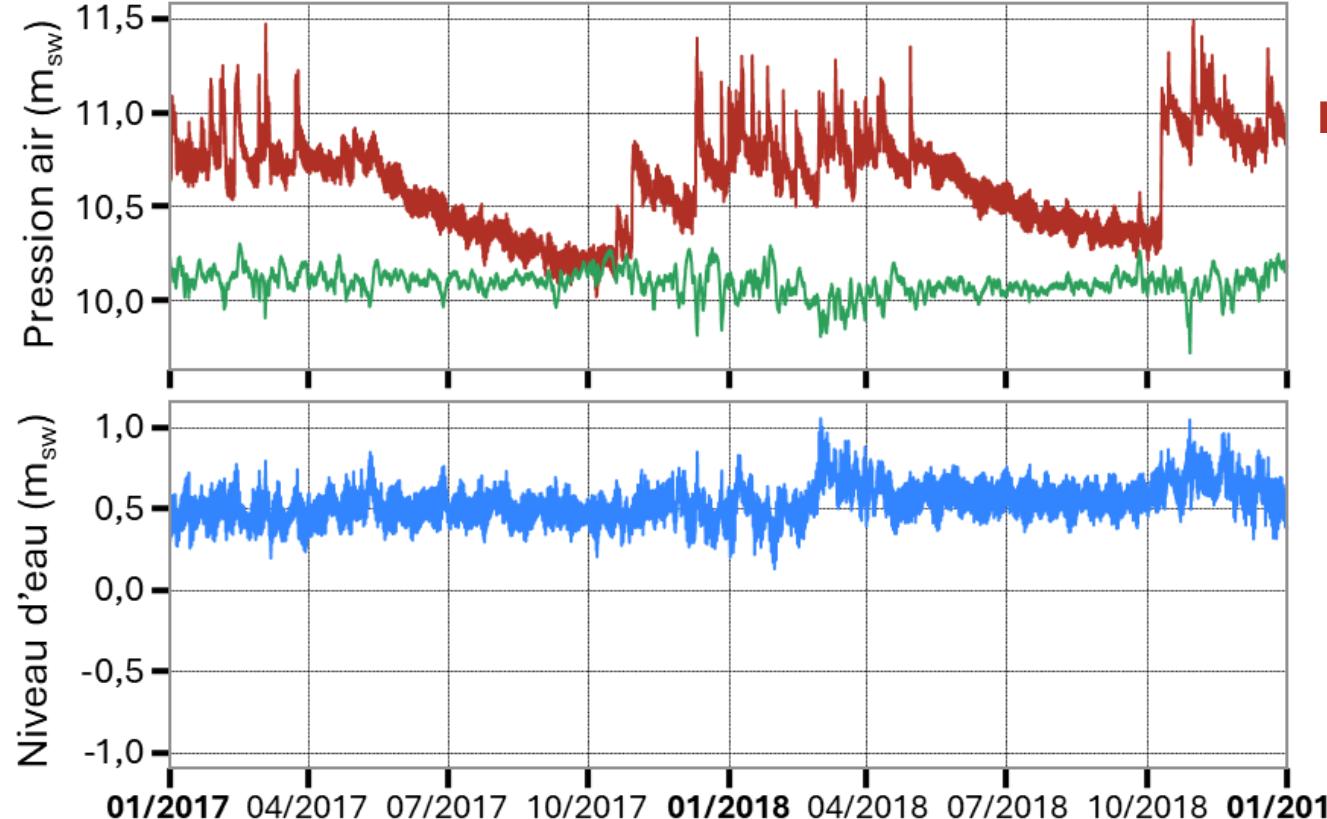
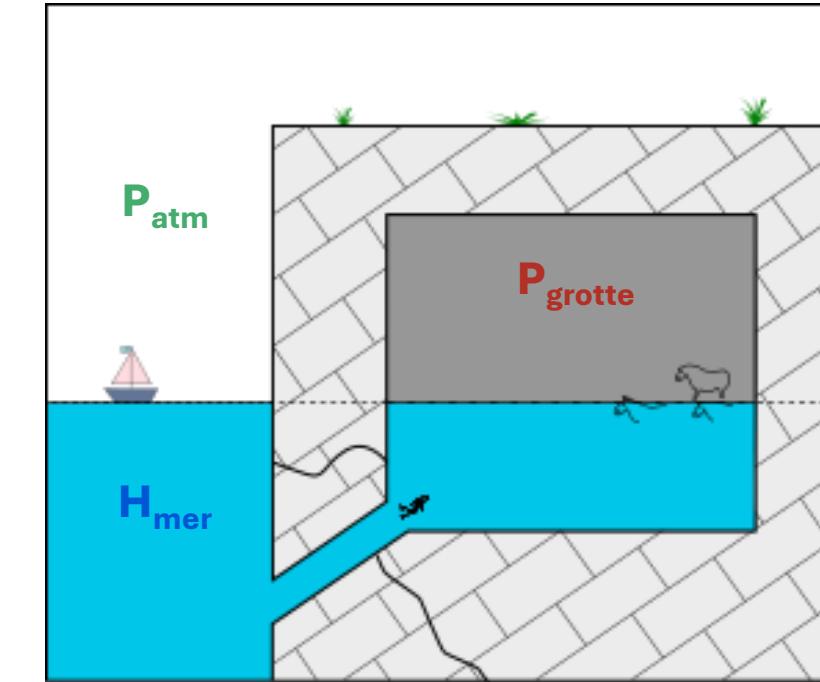
26

Cas d'étude



Matériel et données

1 Hydroclim et perméa

 P_{grotte} P_{atm} H_{mer}  $P_{grotte} > P_{atm}$

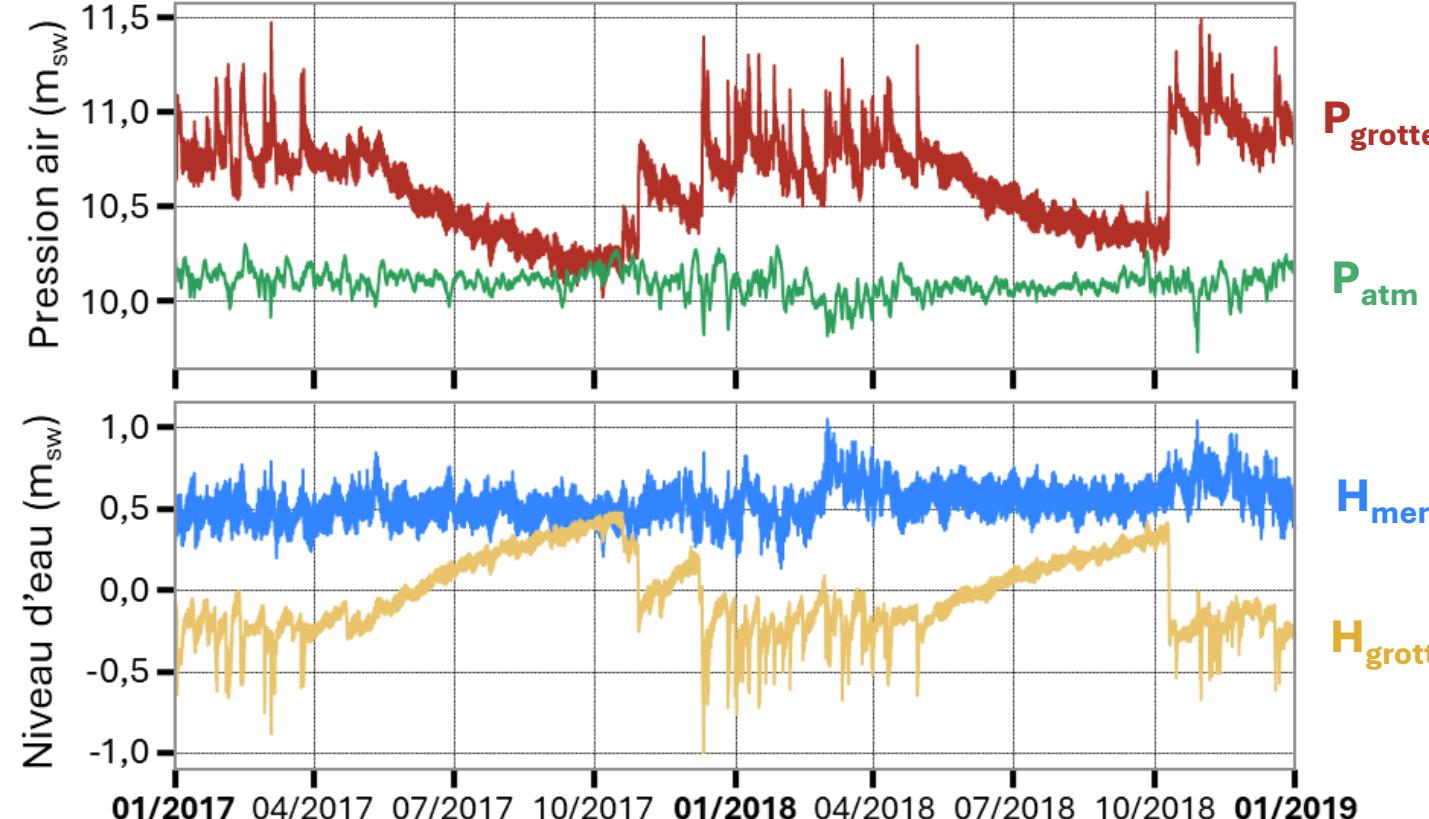
Fonctionnement hydroclimatique

27

Cas
d'étude

Matériel
et
données

1
Hydroclim
et
perméa

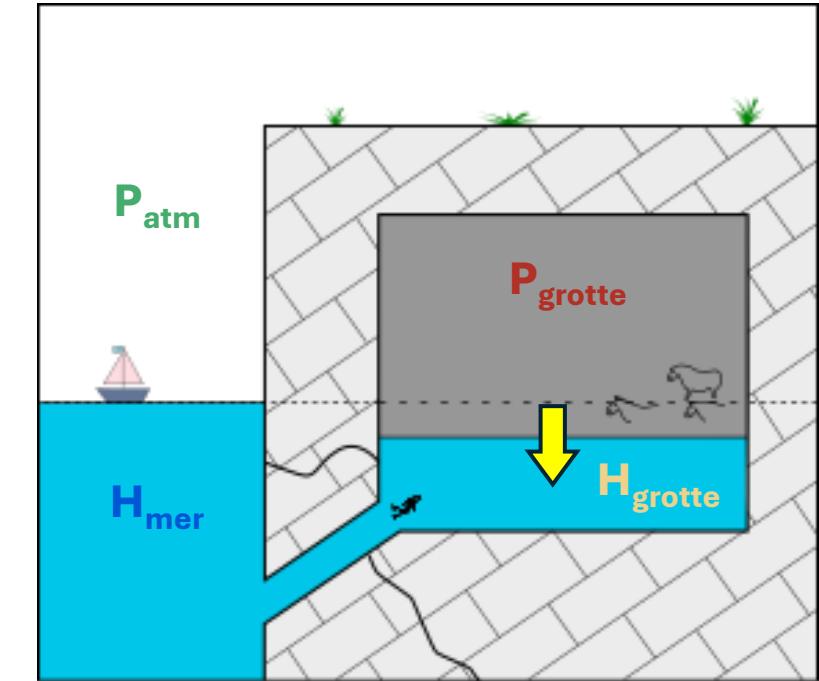


P_{grotte}

P_{atm}

H_{mer}

H_{grotte}



$P_{grotte} > P_{atm}$

$H_{grotte} < H_{mer}$

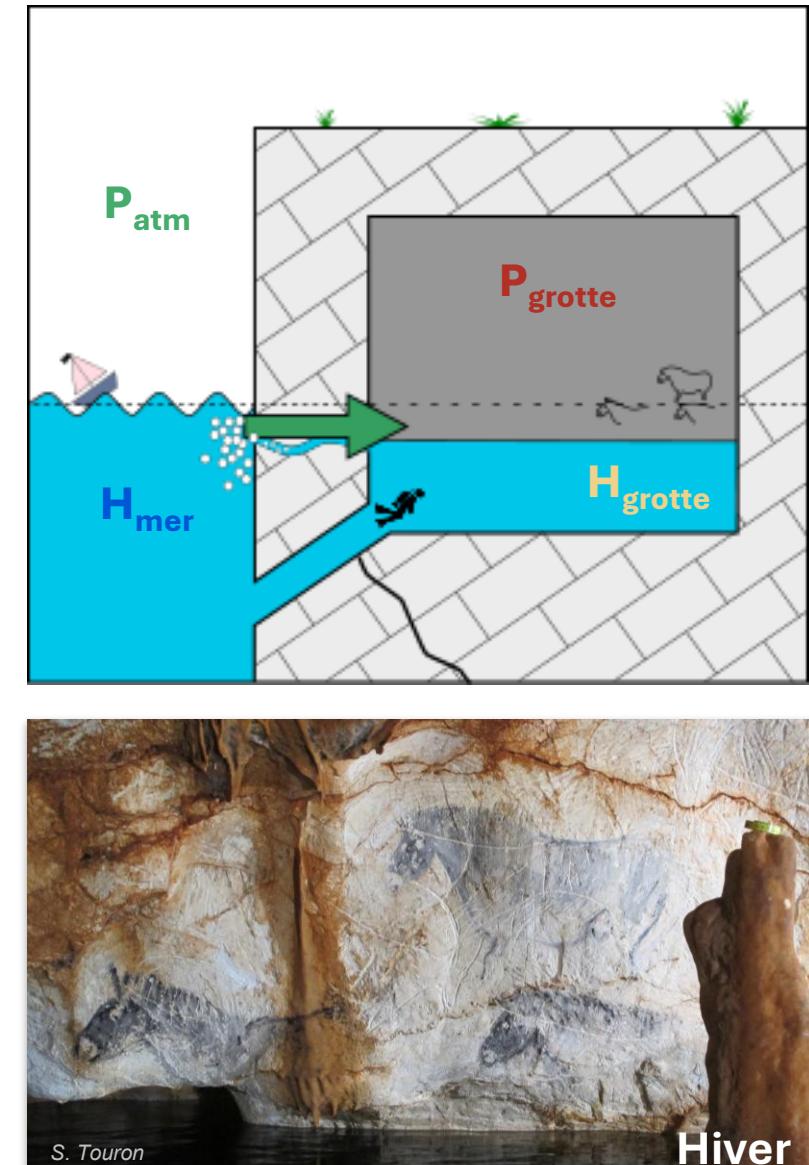
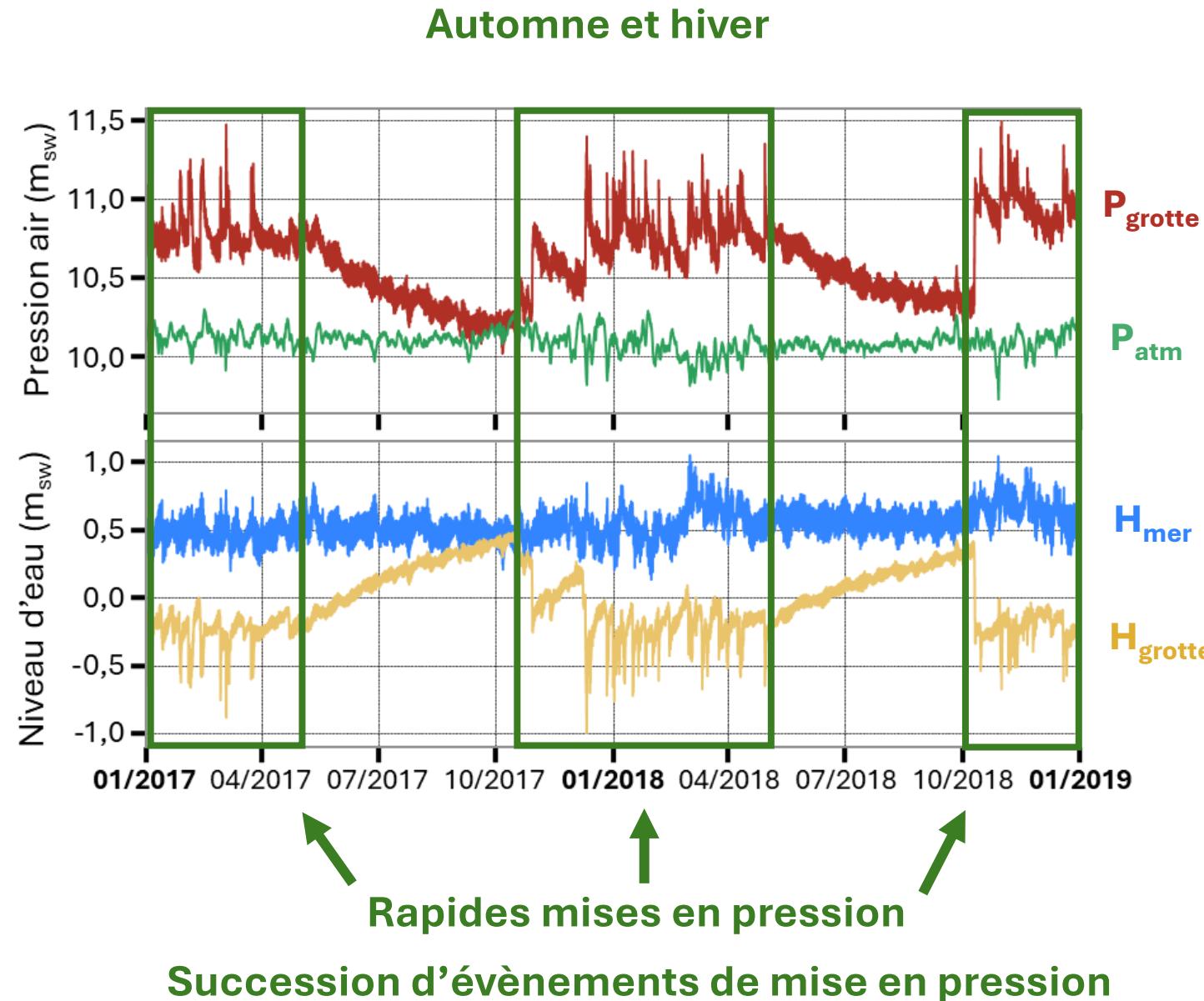
Fonctionnement hydroclimatique : saisonnalités

28

Cas d'étude

Matériel et données

1 Hydroclim et perméa



Fonctionnement hydroclimatique : saisonnalités

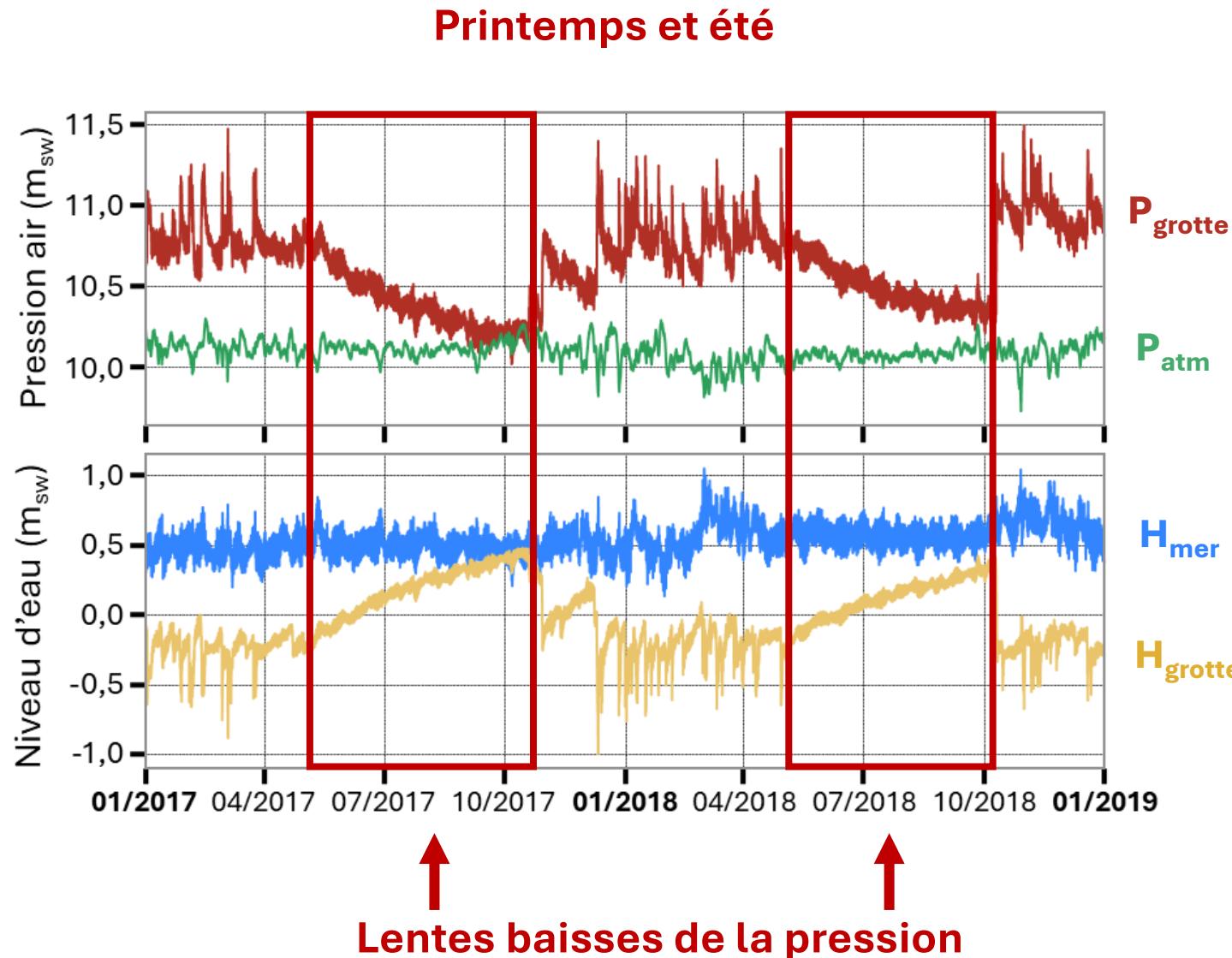
29

Cas d'étude



Matériel et données

1. Hydroclim et perméa

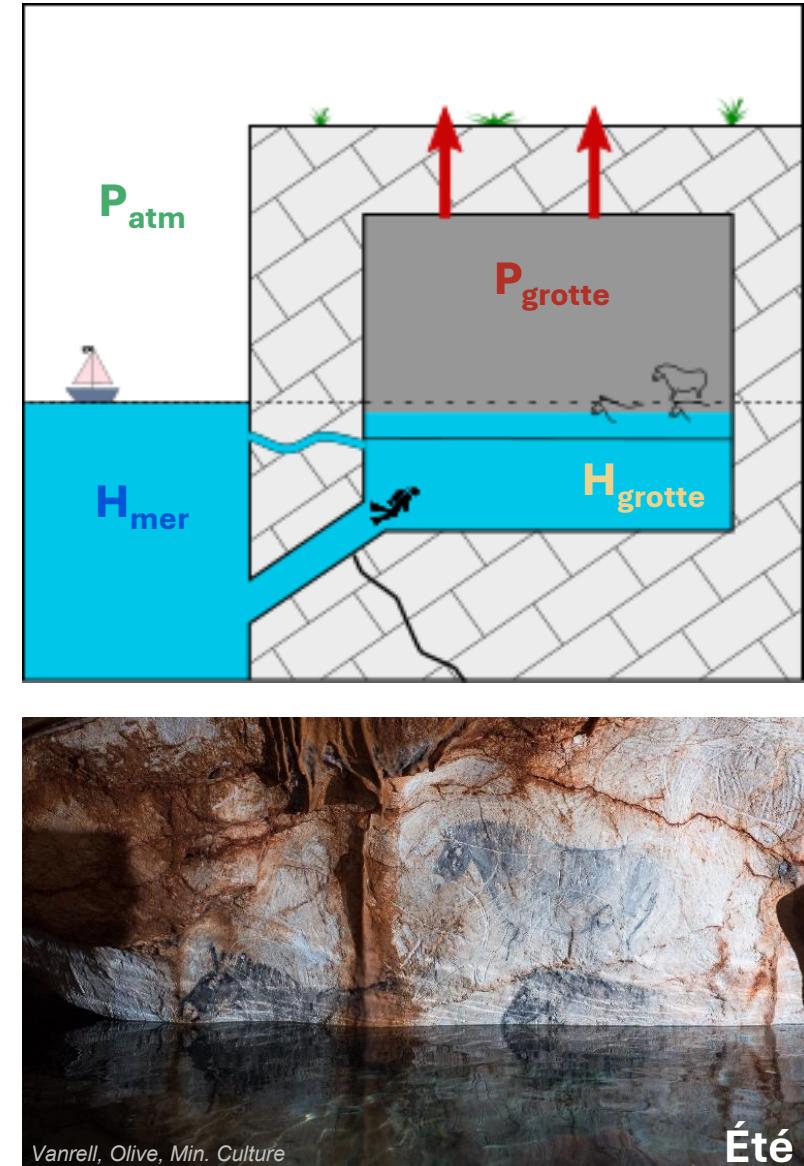


P_{grotte}

P_{atm}

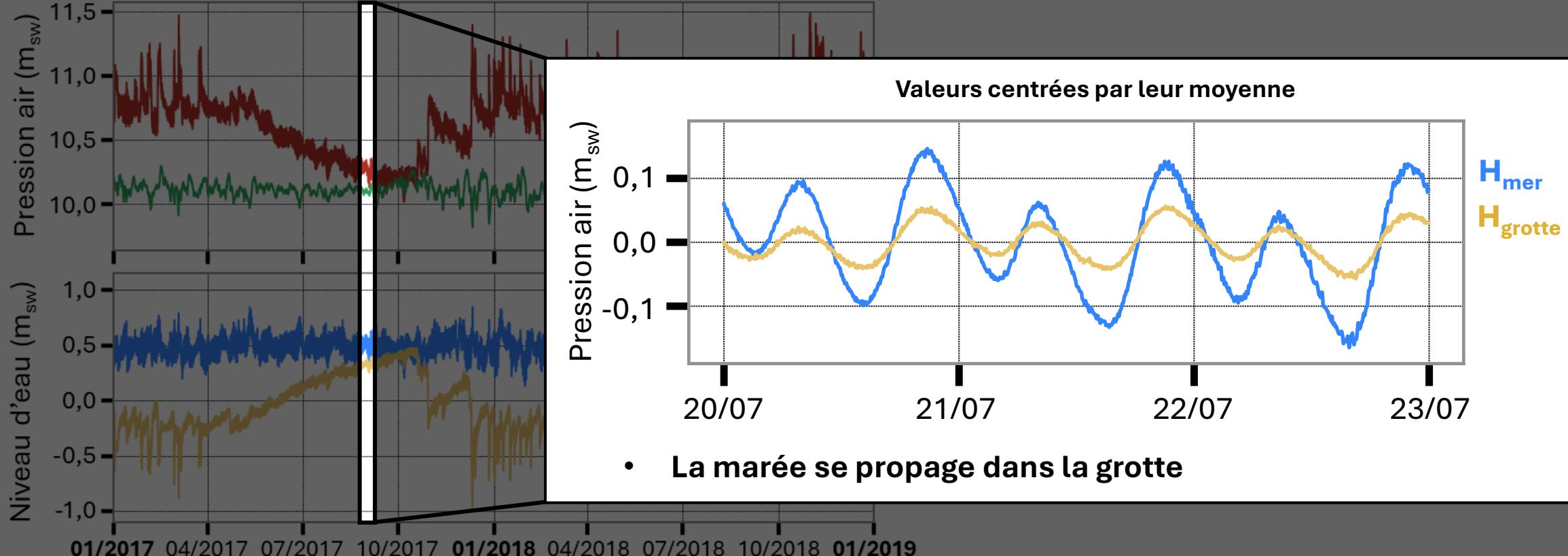
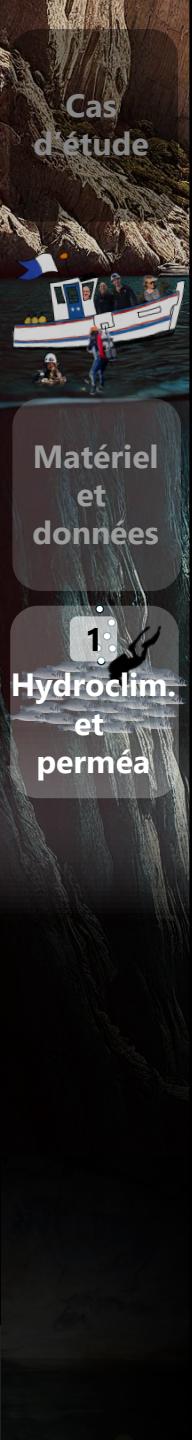
H_{mer}

H_{grotte}



Fonctionnement hydroclimatique : variation avec les marées

30



Fonctionnement hydroclimatique : variation avec les marées

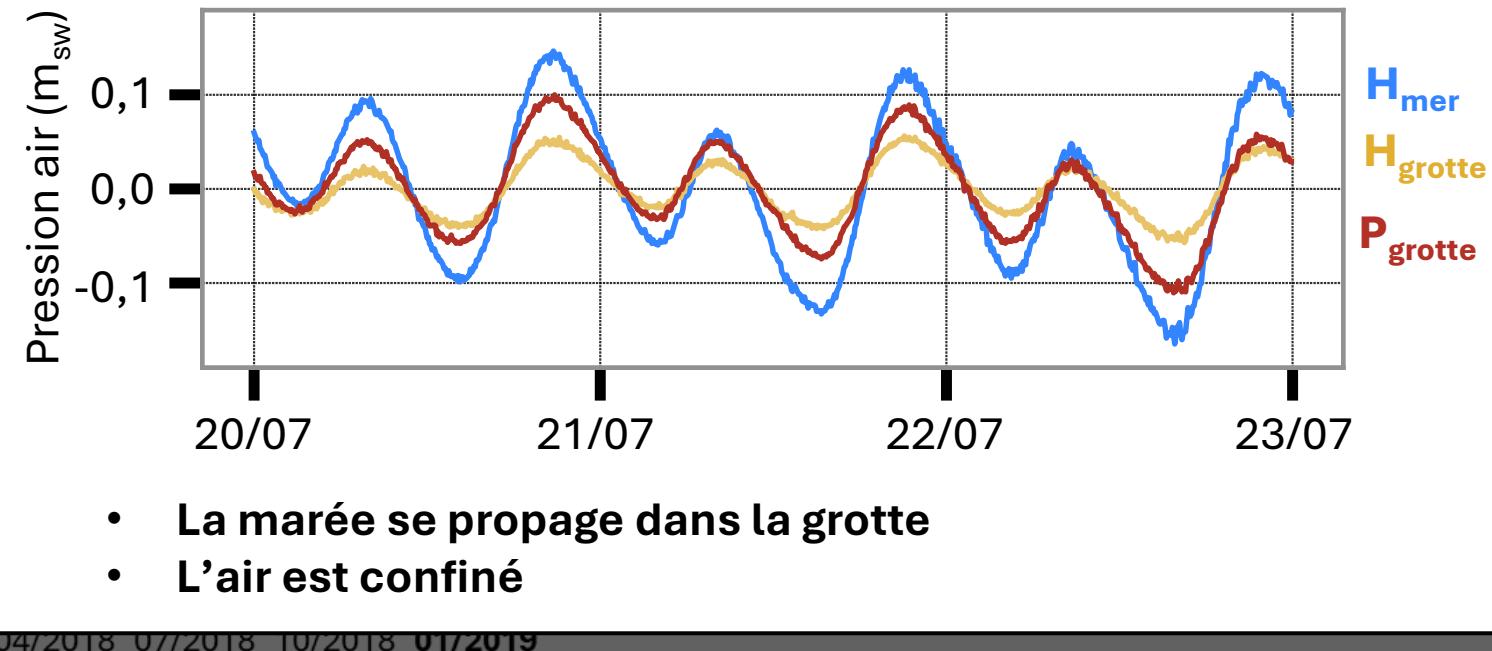
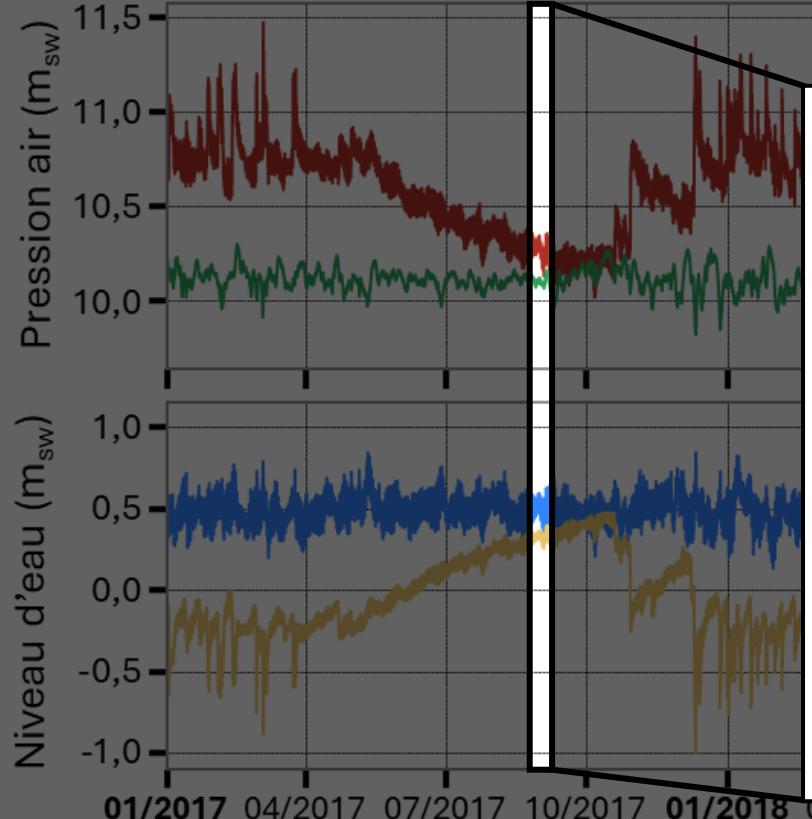
31

Cas d'étude



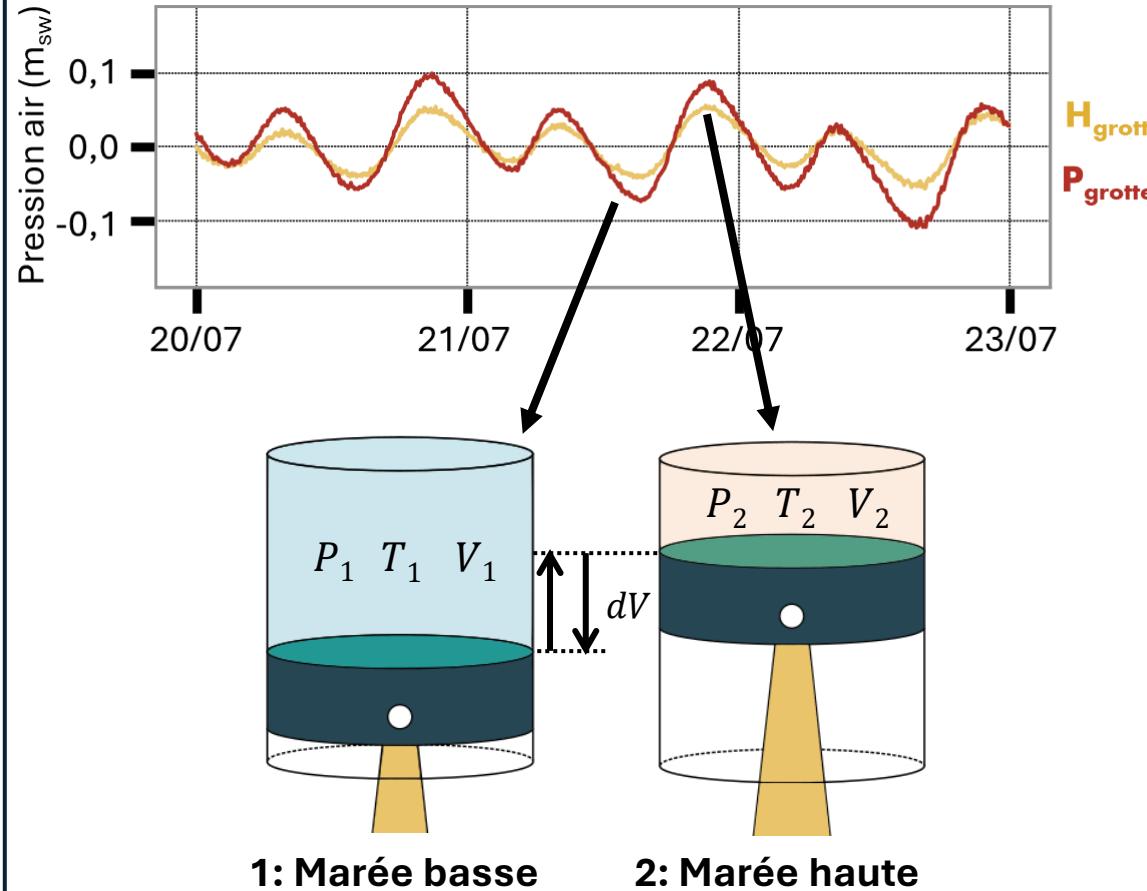
Matériel et données

Hydroclim et perméa





Analogie avec un piston



Calcul du volume de la grotte

Hypothèses :

- Quantité d'air constante
- Surface des plans d'eau constante

Loi des gaz parfait entre marée haute et basse

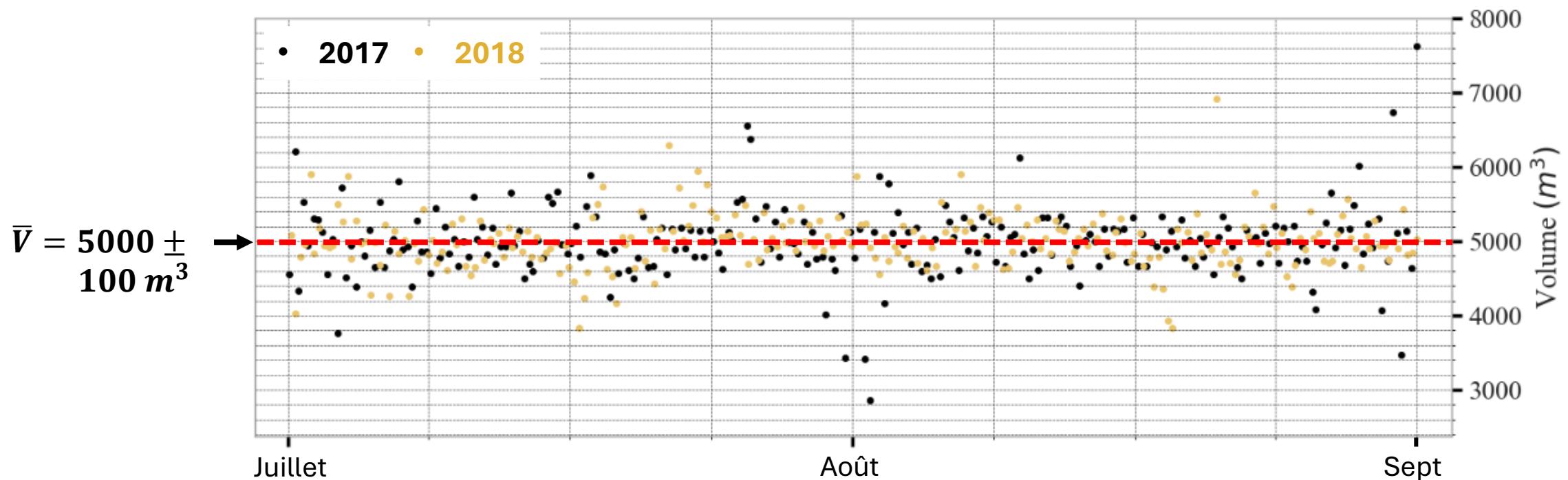
$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$V_1 = V_2 + dV$$

Volume de la grotte à chaque marée
(4 marées/j = 4 résultats/j)



240 mesures de volume entre Juillet et Août par année





Volume

Quantité d'air

$$n = \frac{P_{grotte} V_{grotte}}{RT_{air}}$$

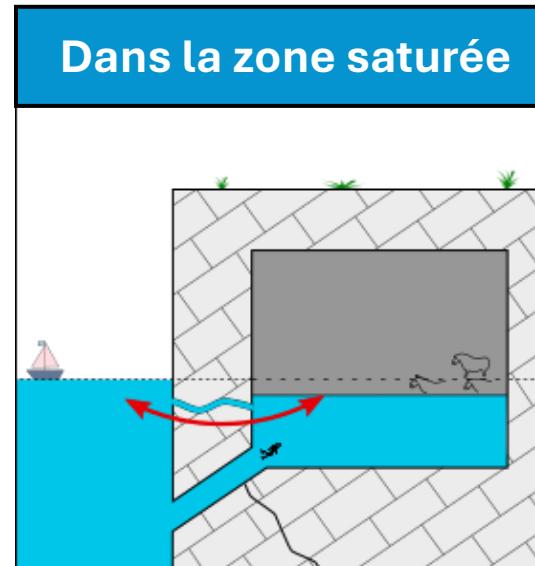
Débit d'air

$$Q = \frac{RT}{P} \frac{dn}{dt}$$

Evènement de mise en pression (01/05/2018)

Débit d'air entrant ≈ 91 – 220 m³.h⁻¹
 Débit d'air sortant ≈ -20 m³.h⁻¹

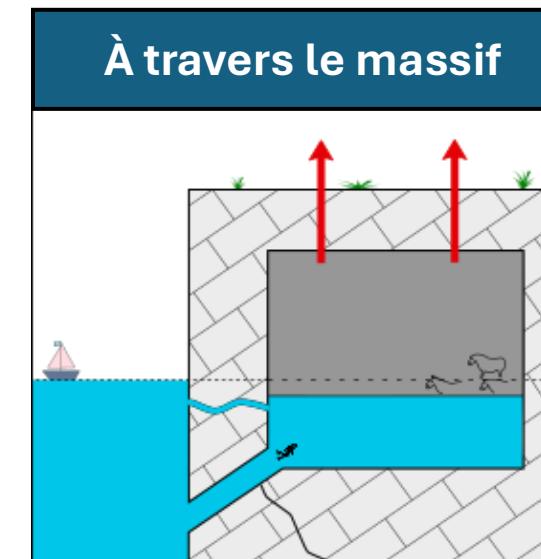
Larges conduits dans la zone saturée



Lente baisse de la pression estivale

Débit d'air sortant ≈ -0.24 m³.h⁻¹
 → Facteur 100 à 1000

Perméabilité dans la zone vadose



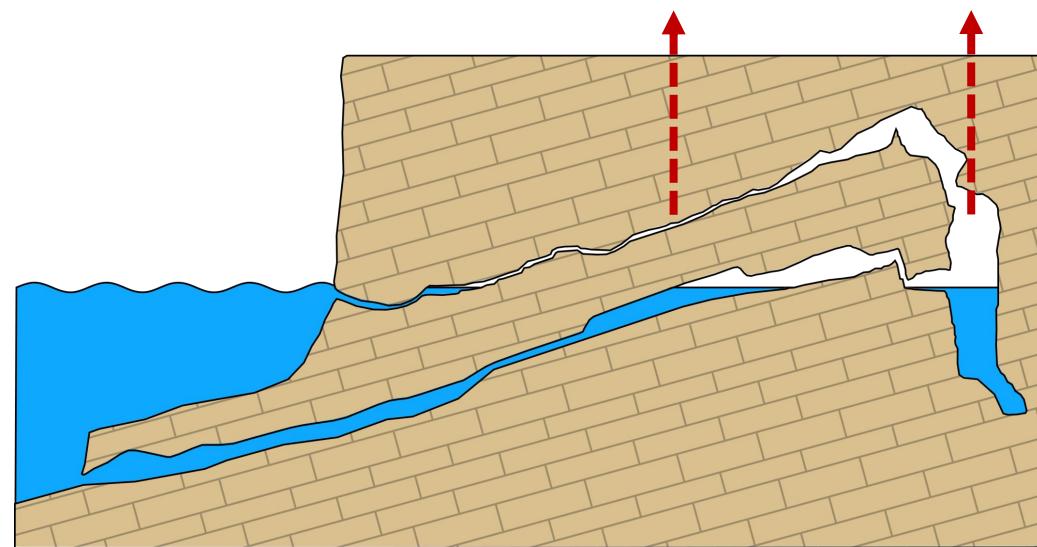
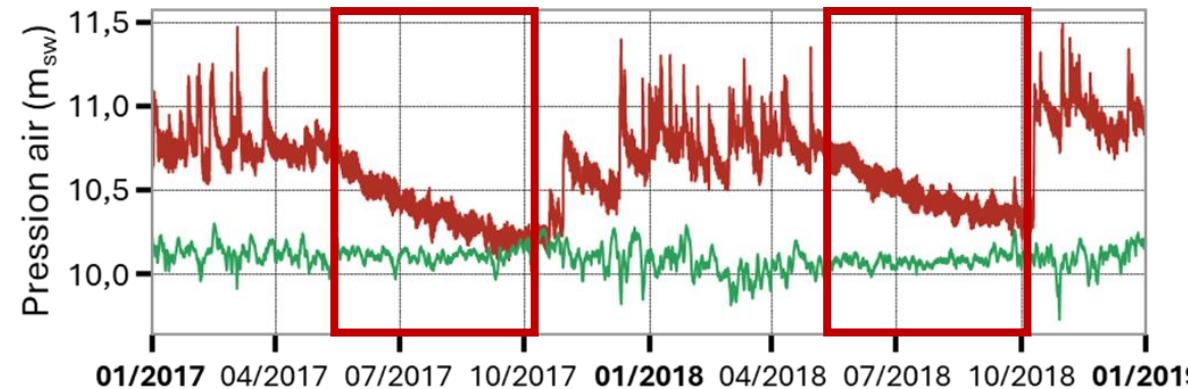
Calcul de la perméabilité

Cas d'étude



Matériel et données

1
Hydroclimat et perméabilité



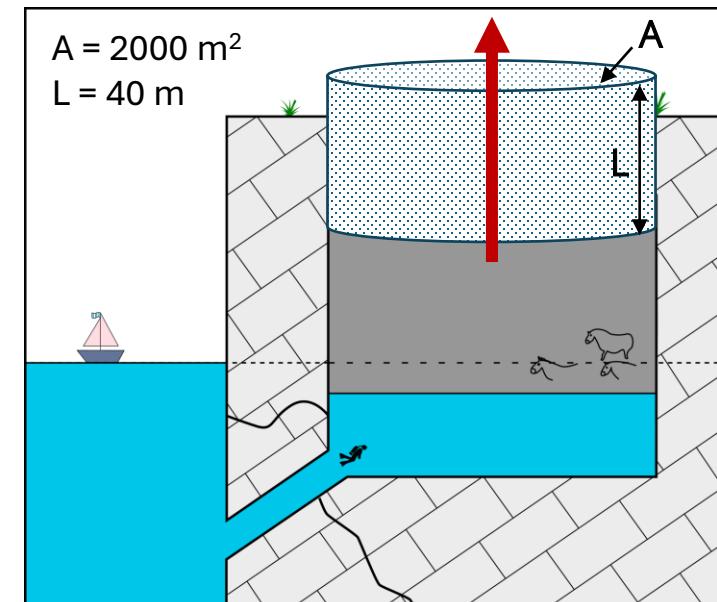
Loi de Darcy

$$Q = \frac{k_a A}{\mu L} (P_{air} - P_{atmo})$$

k_a : Perméabilité effective à l'air pour un milieu poreux partiellement saturé

→ 1 valeur par an : moyenne de juillet et août

Milieu poreux



$$k_a = 4,6 \text{ à } 11,5 \text{ mD (2015 à 2023)}$$

Calcul de la perméabilité

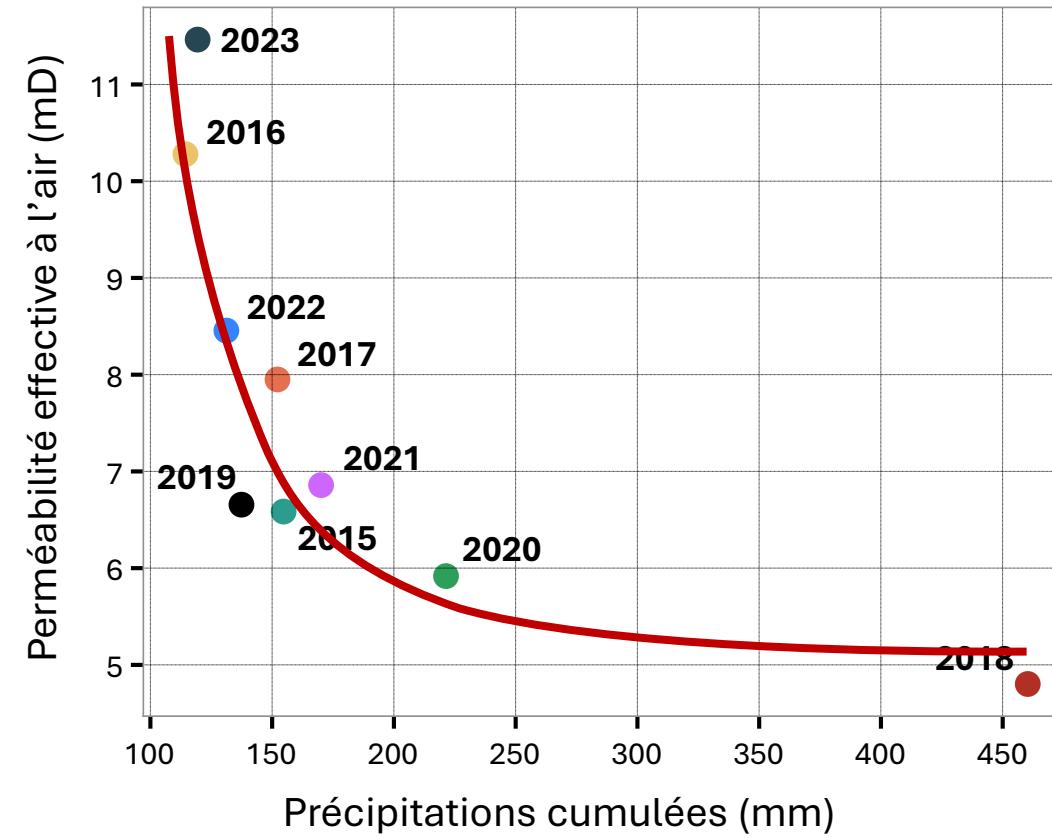
Cas d'étude

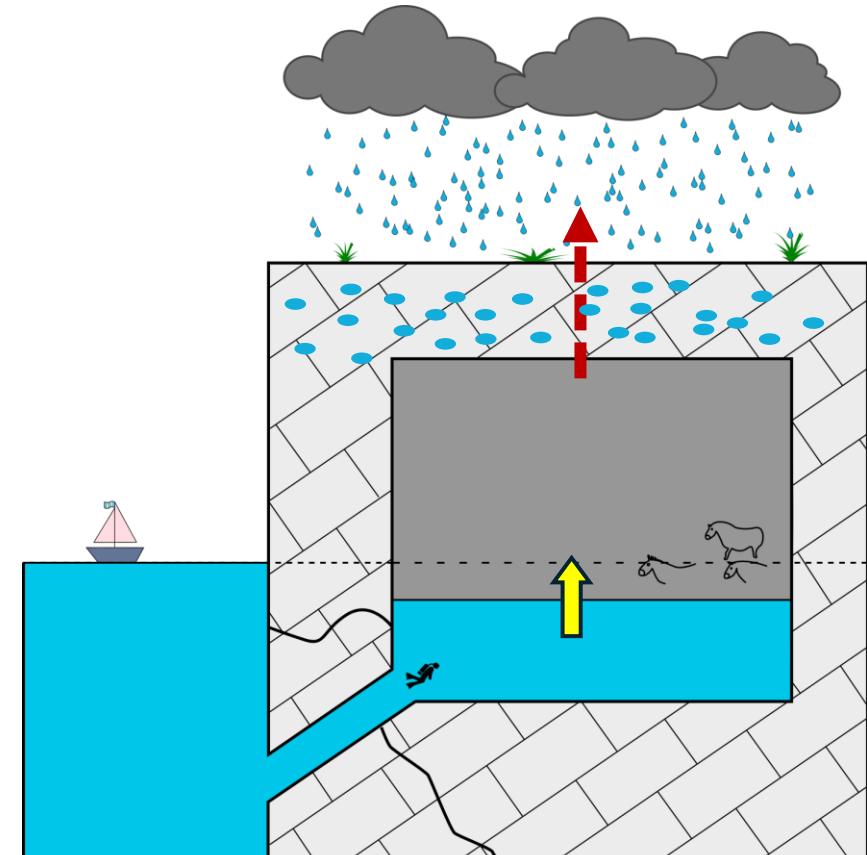
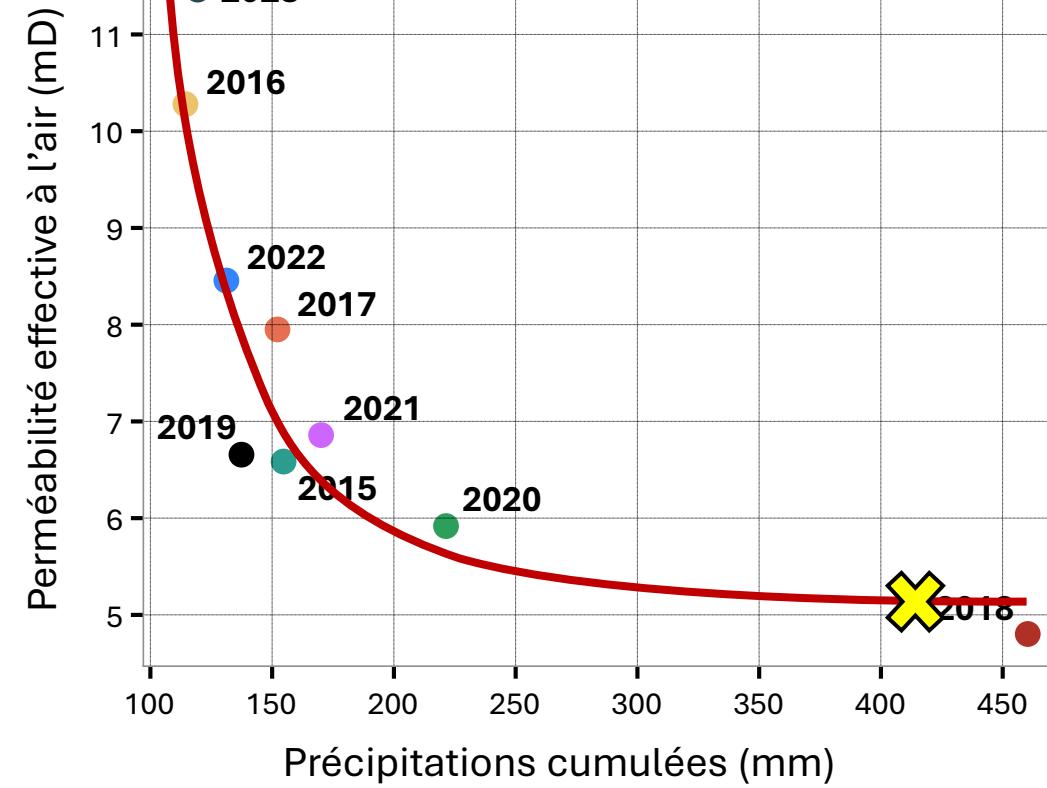


Matériel et données

1 Hydroclimat et perméa

Comparaison de la perméabilité avec les précipitations cumulées de mars à août (2015 à 2023)





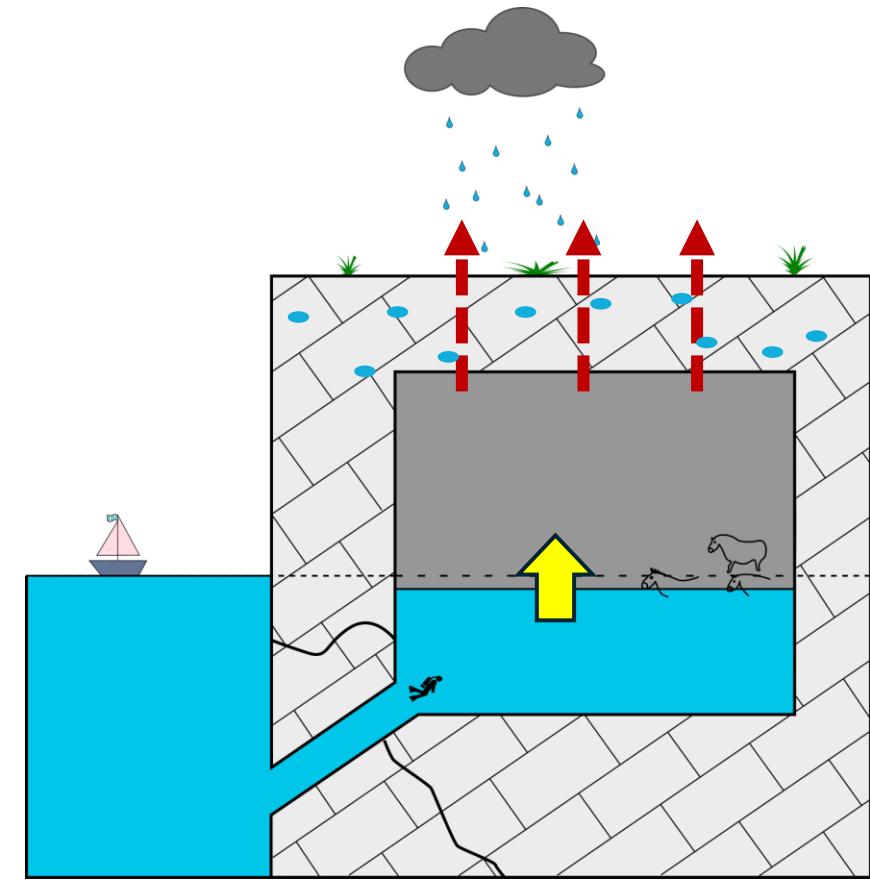
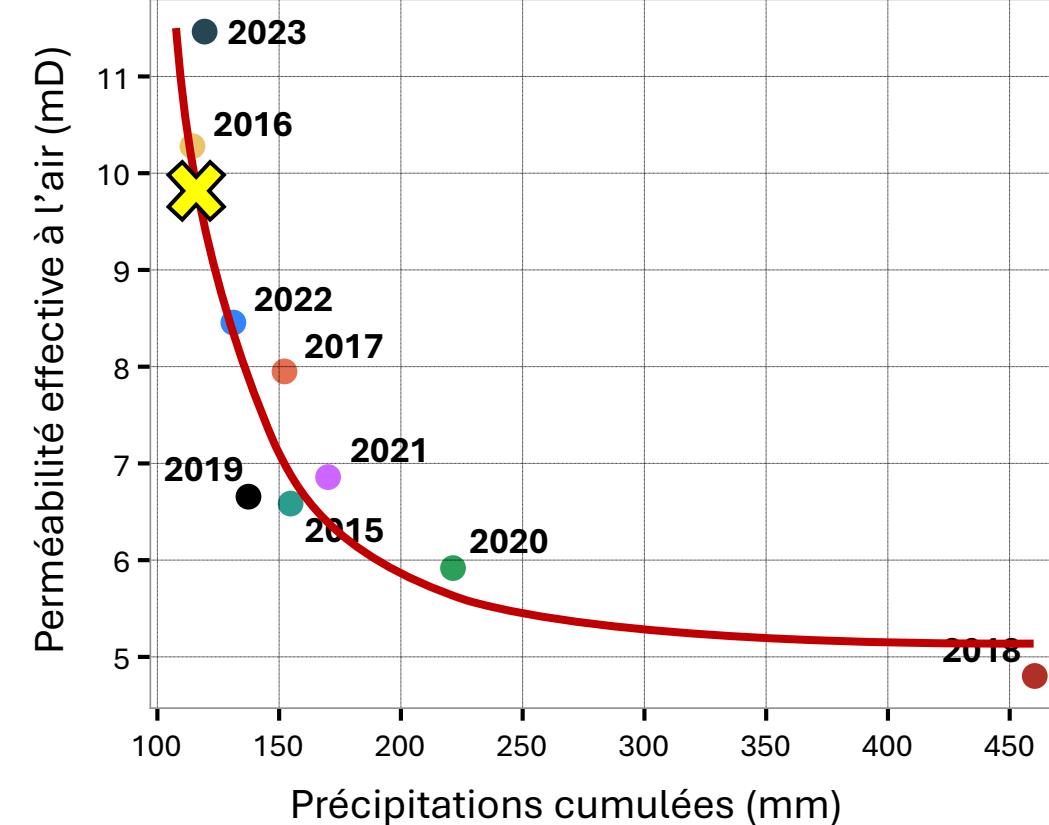
Année pluvieuse

Calcul de la perméabilité

Cas d'étude

Matériel et données

1 Hydroclim et perméa



Année sèche

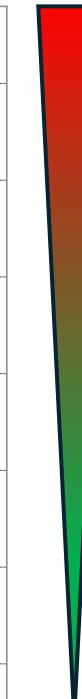
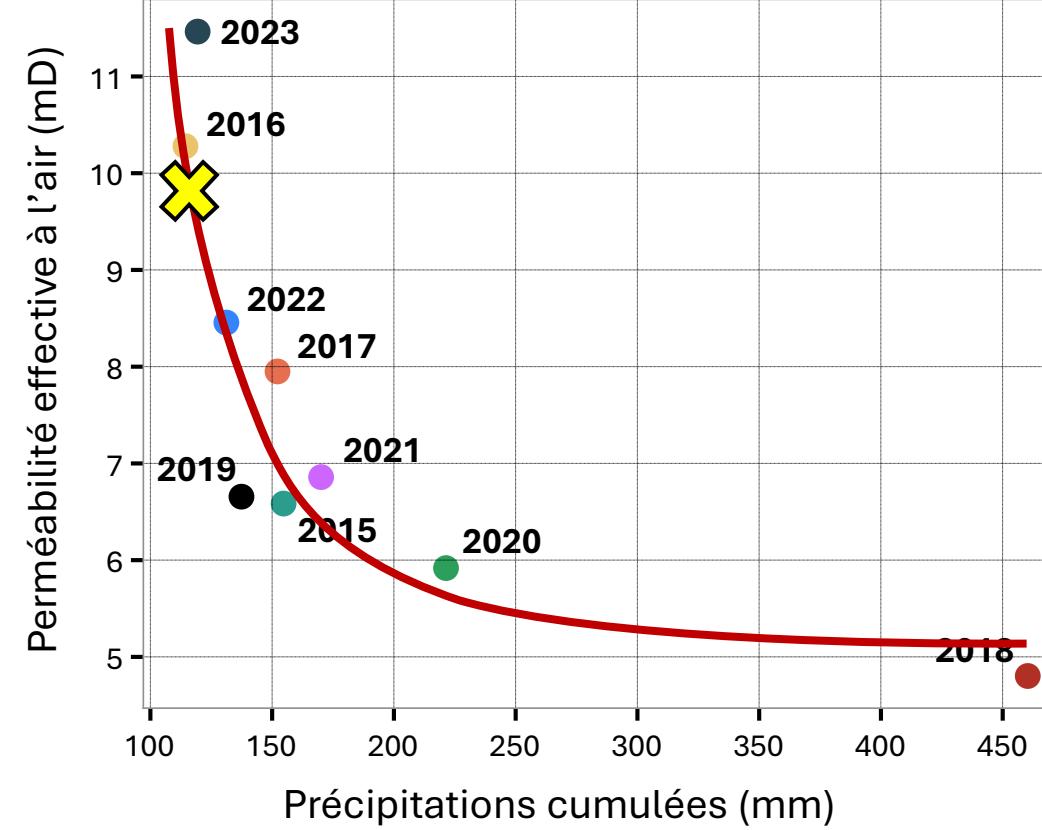


Calcul de la perméabilité

Cas d'étude

Matériel et données

1 Hydroclimat et perméabilité

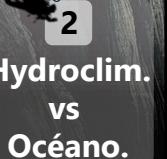


Changement climatique

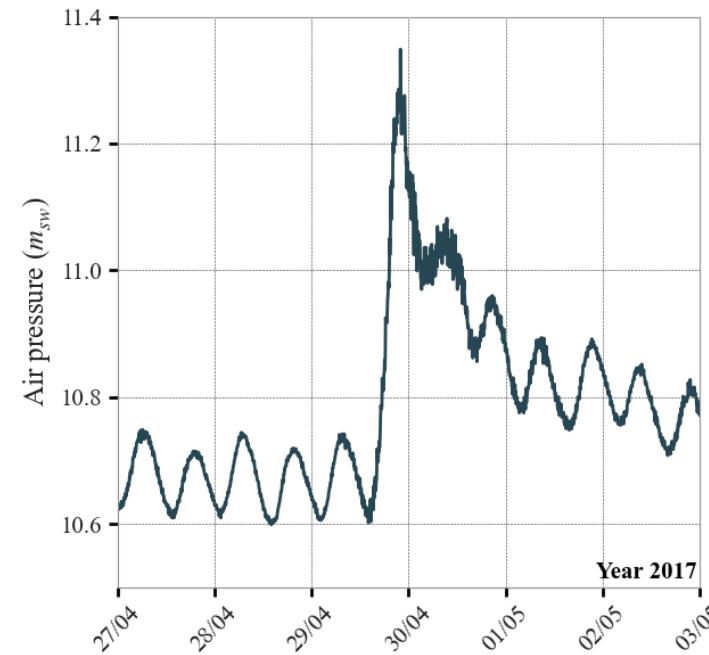
- Sècheresses plus fréquentes
- Remontée plus rapide des plans d'eau
- Assèchement des argiles
- Nouveaux échanges avec l'extérieur

→ Valables pour les grottes peu profondes





1^{ère} étape : définir les évènements de mise en pression

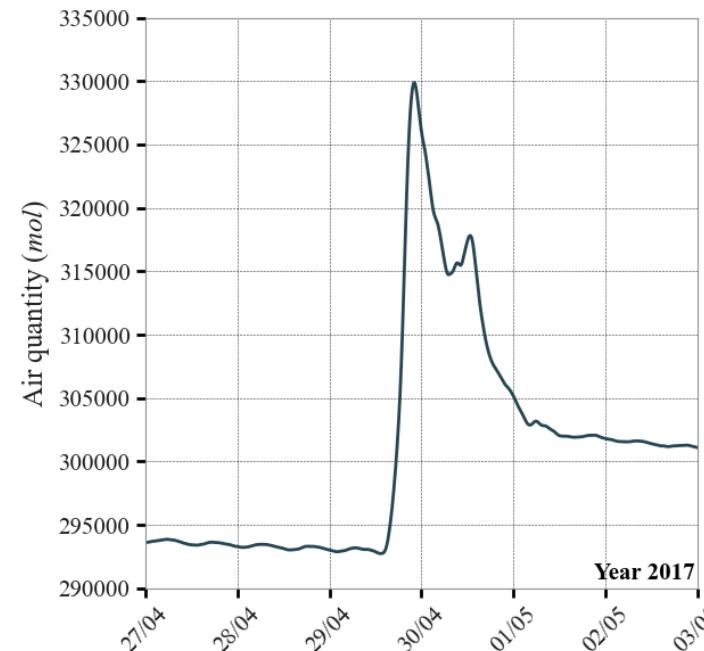


La pression de l'air varie :

- Avec le niveau de la mer (marées, surcôtes...)
- **Avec des variations de quantités d'air**



1^{ère} étape : définir les évènements de mise en pression

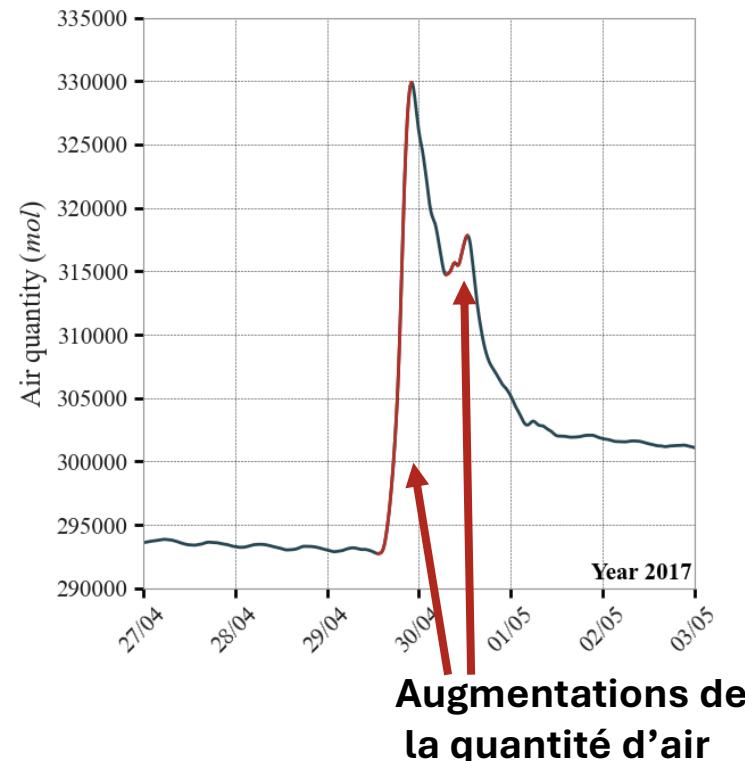


La pression de l'air varie :

- Avec le niveau de la mer (marées, surcôtes...)
- **Avec des variations de quantités d'air**



1^{ère} étape : définir les évènements de mise en pression

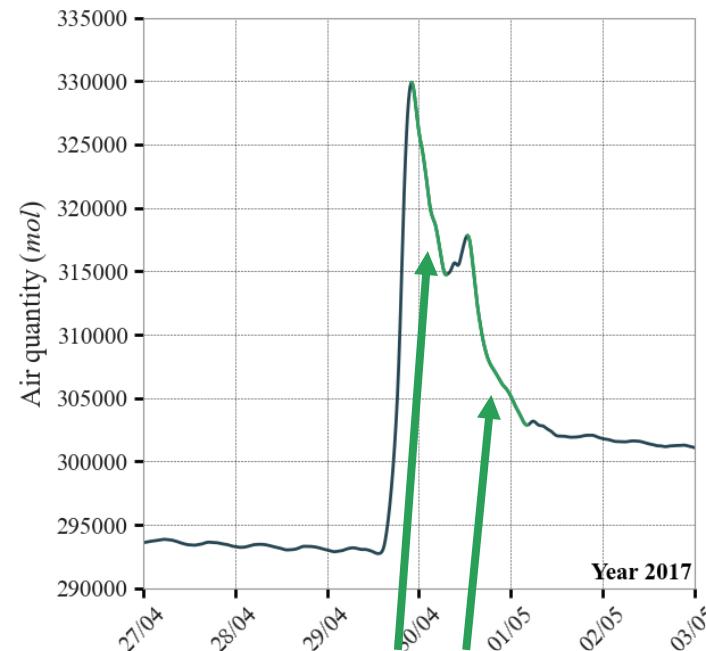


Définition

- Entrées ou succession d'entrées d'air dans la grotte faisant augmenter la pression de l'air



1^{ère} étape : définir les évènements de mise en pression



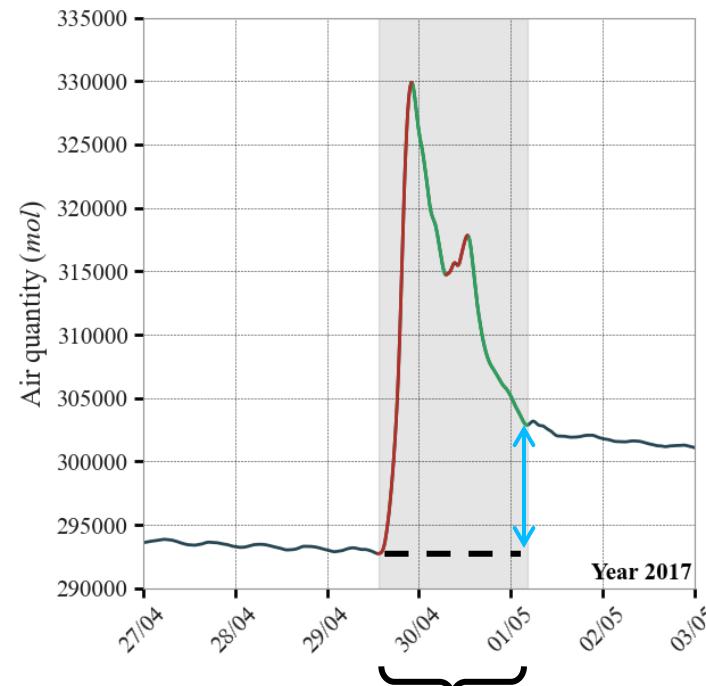
Rapides baisses de
la quantité d'air

Définition

- Entrées ou succession d'entrées d'air dans la grotte faisant augmenter la pression de l'air
- Peut être suivie par une rapide baisse de la pression



1^{ère} étape : définir les évènements de mise en pression

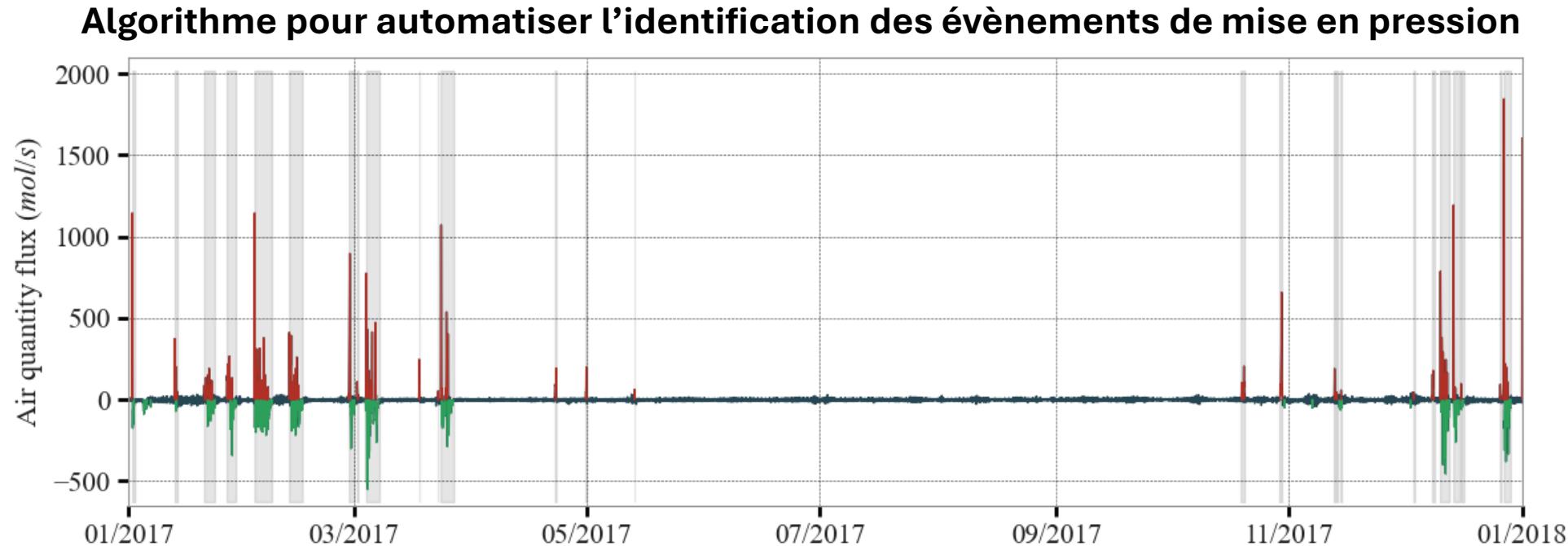


Définition

- Entrées ou succession d'entrées d'air dans la grotte faisant augmenter la pression de l'air
- Peut être suivie par une rapide baisse de la pression
- Bilan d'air positif à la fin (sauf exceptions)



2^e étape : identifier les évènements de mise en pression



→ Comparaison des périodes d'entrées d'air avec les conditions océanographiques



3^e étape : comparaison avec les données océanographiques

Pas de mise en pression

Photo : B. Arfib



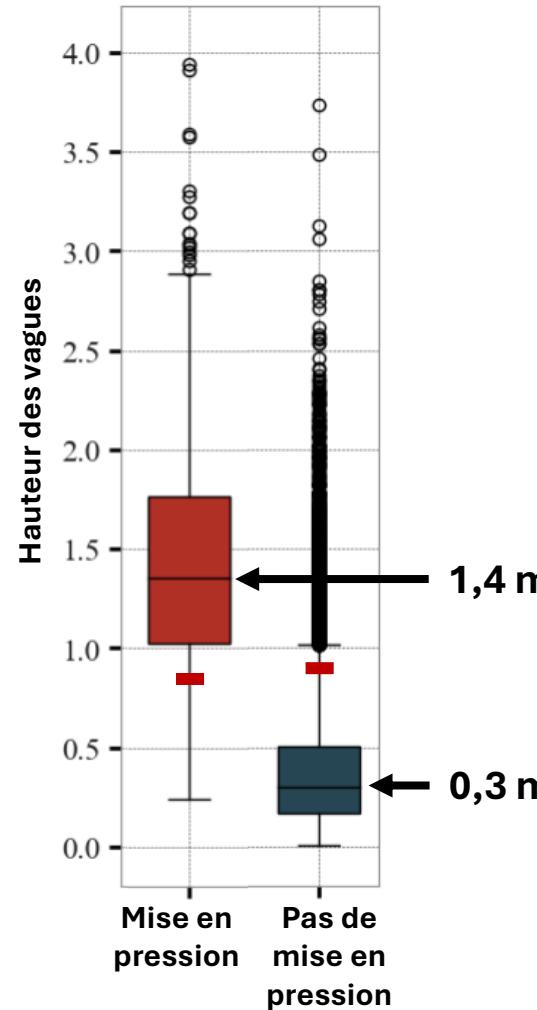
Mise en pression de la grotte

Photo : B. Arfib



Conditions océanographiques :

- Hauteur des vagues
- Direction des vagues
- Hauteur de la mer

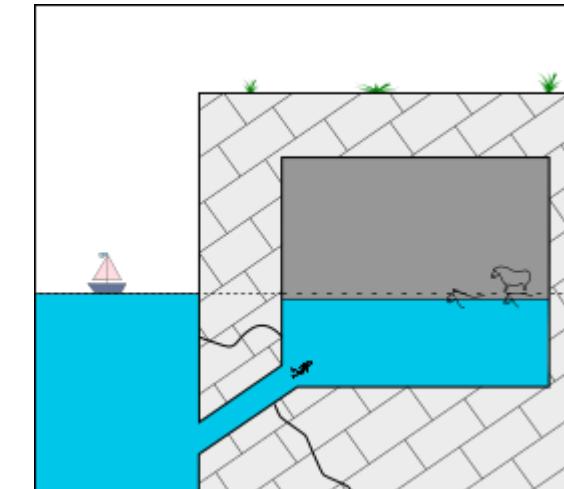


Hors évènement de mise en pression : 90 % des vagues < 0,8 m

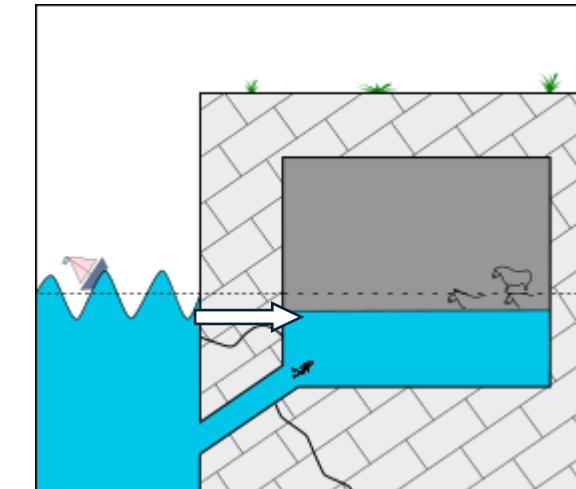
Durant évènement de mise en pression : 90 % des vagues > 0,8 m

→ principal moteur à la mise en pression de la grotte

Pas de vagues



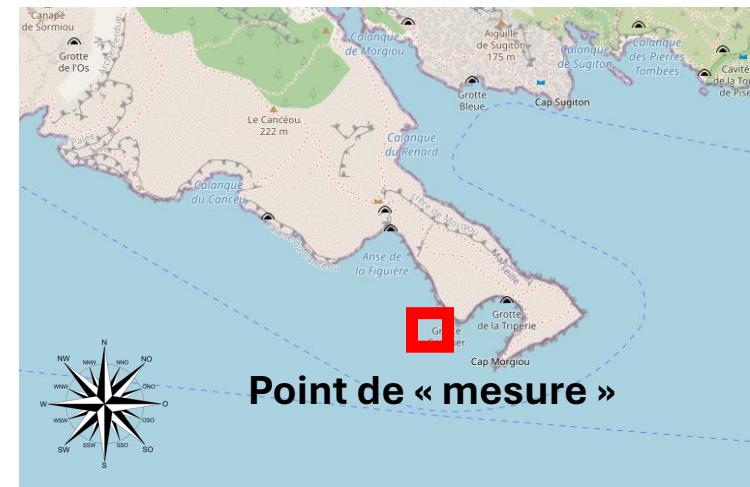
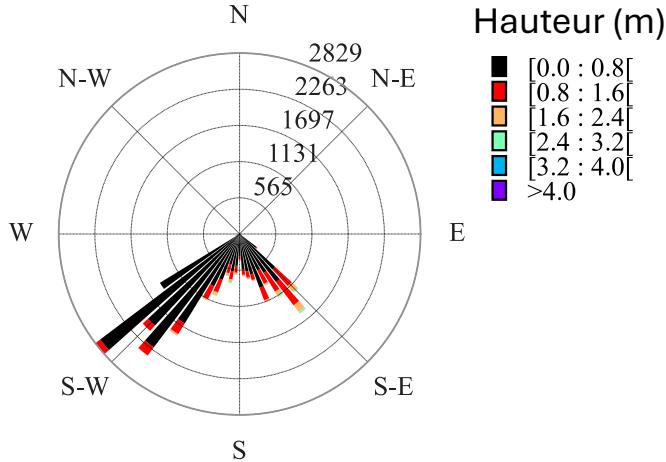
Vagues > seuil





3^e étape : comparaison avec les données océanographiques – direction des vagues

Toutes les données
(2015-2023)



Vagues SO dominantes



Cas
d'étude

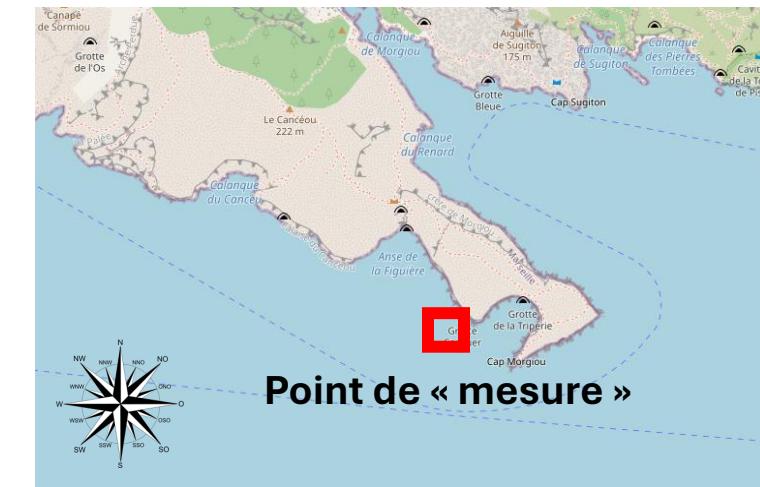
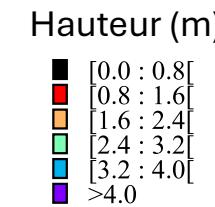
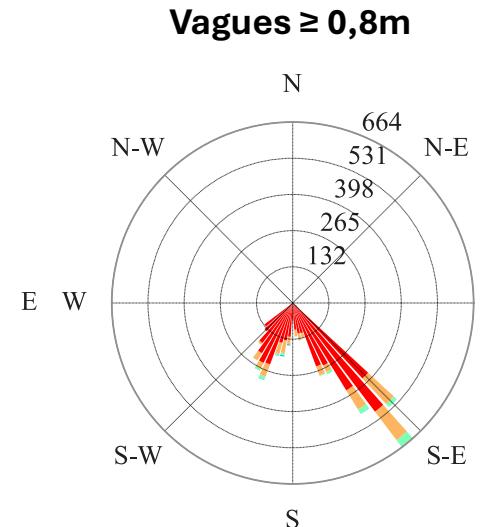
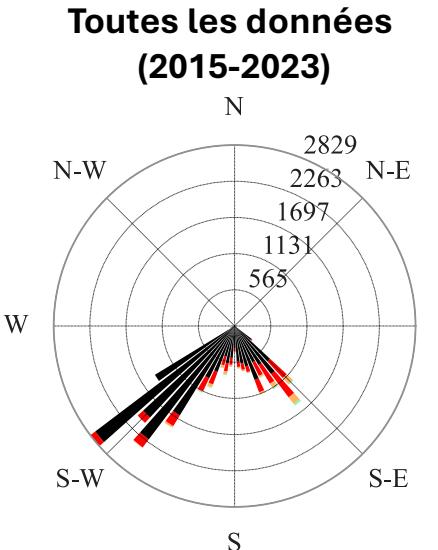


Matériel et données

1 Hydroclim. et perméa

2
Hydroclim.
vs
Océano.

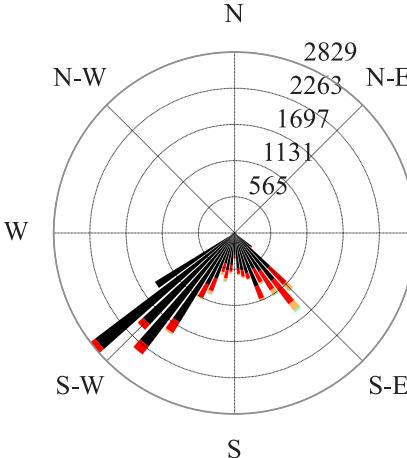
3^e étape : comparaison avec les données océanographiques – direction des vagues



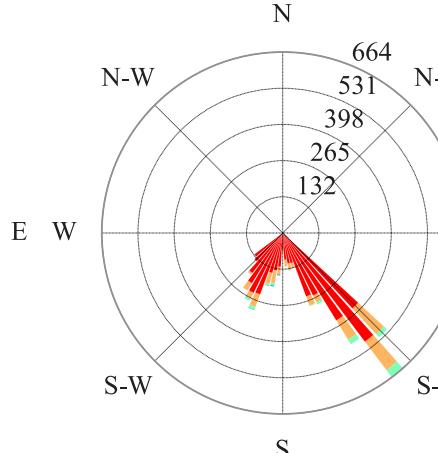


3^e étape : comparaison avec les données océanographiques – direction des vagues

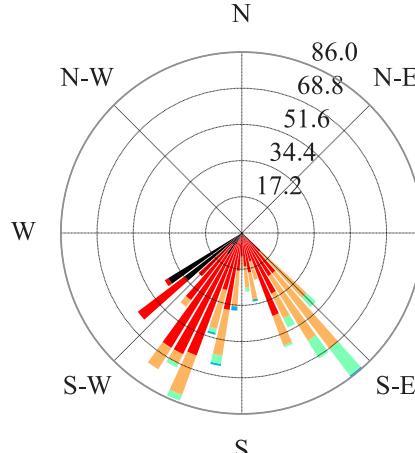
Toutes les données
(2015-2023)



Vagues $\geq 0,8m$



Entrées d'air



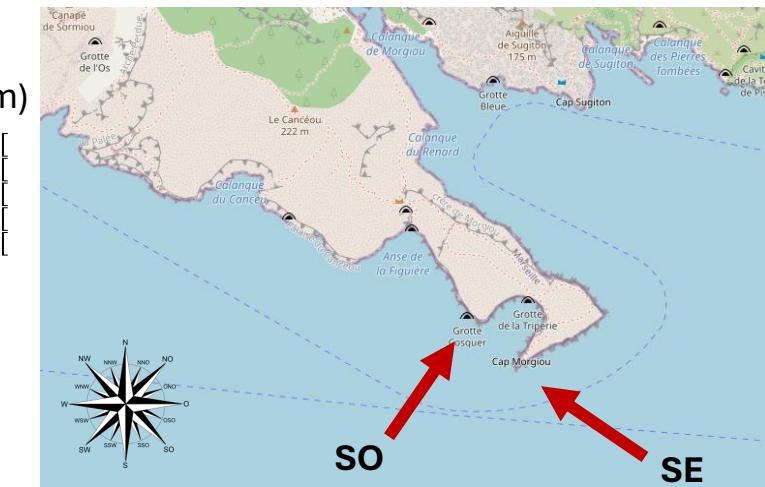
Hauteur (m)

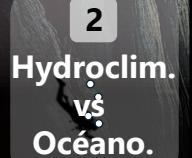
[0.0 : 0.8]
[0.8 : 1.6]
[1.6 : 2.4]
[2.4 : 3.2]
[3.2 : 4.0]
>4.0

Vagues SO dominantes

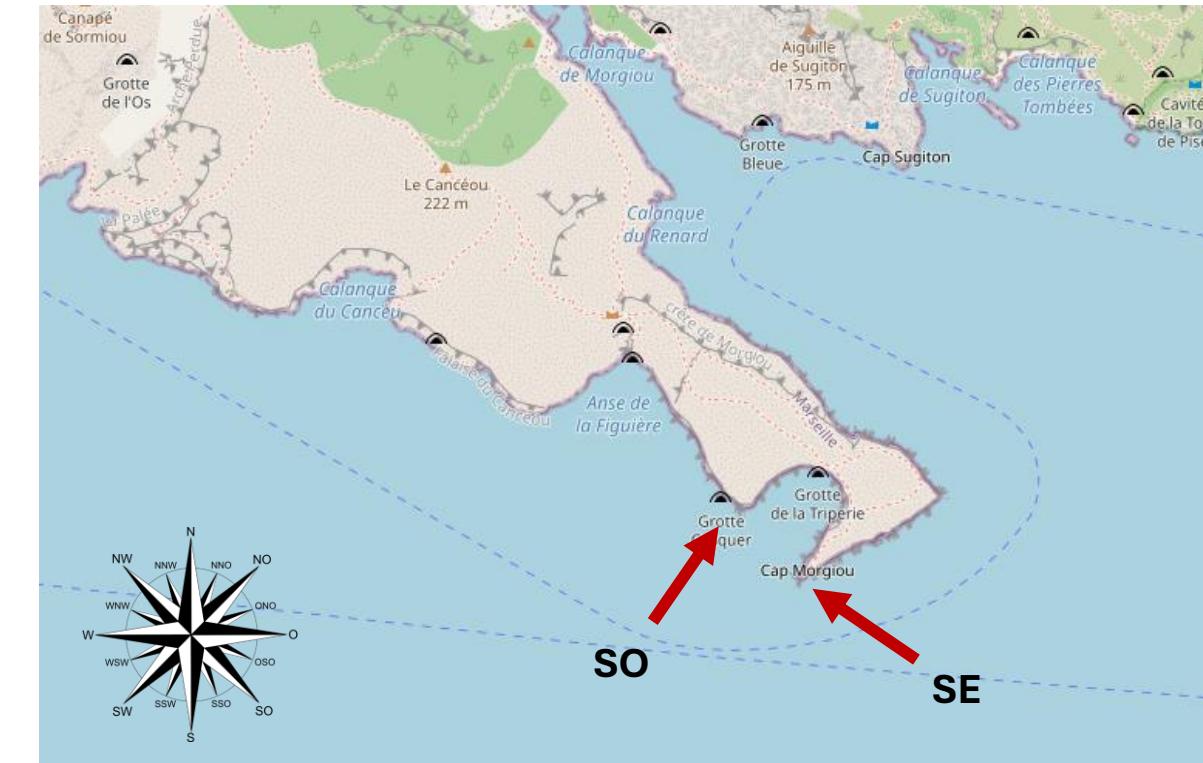
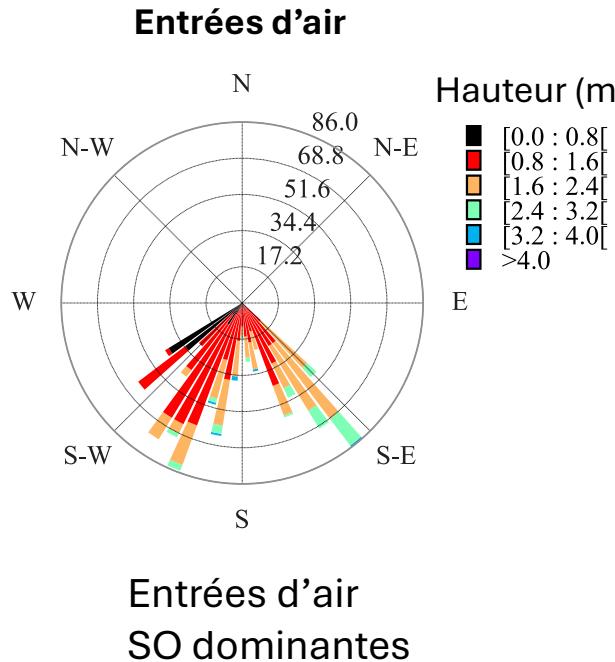
Vagues > 0,8 m
SE dominantes

Entrées d'air
SO dominantes





3^e étape : comparaison avec les données océanographiques – direction des vagues

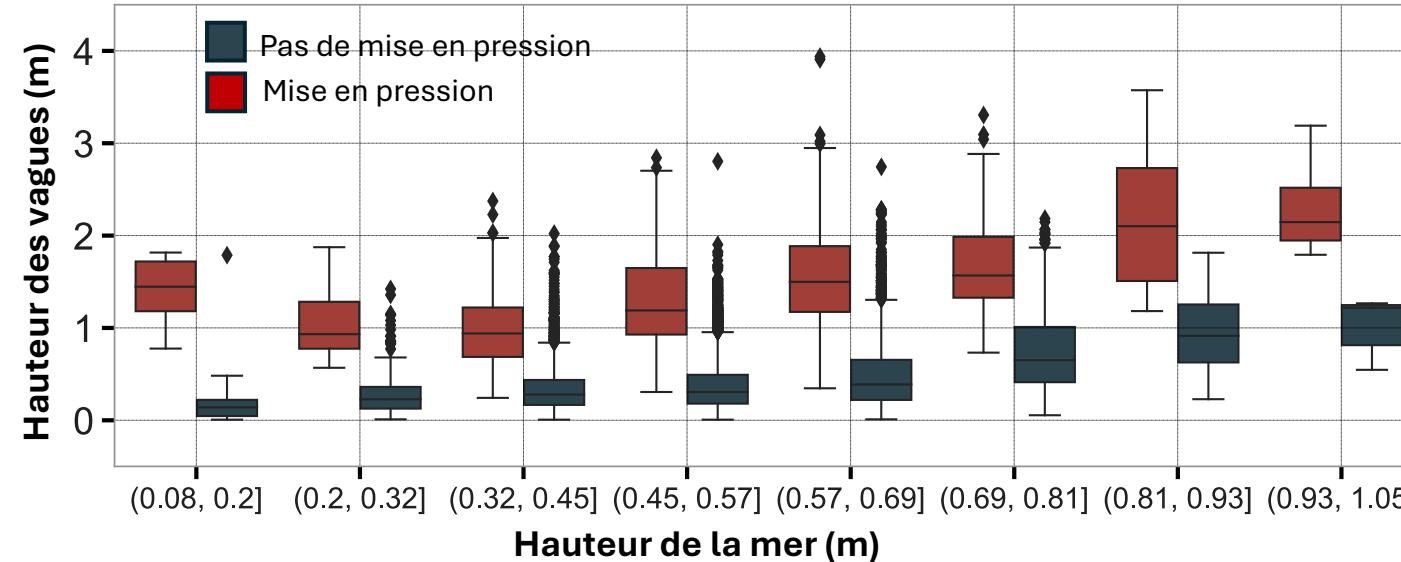


→ Vagues SO plus favorables : perpendiculaires à la paroi

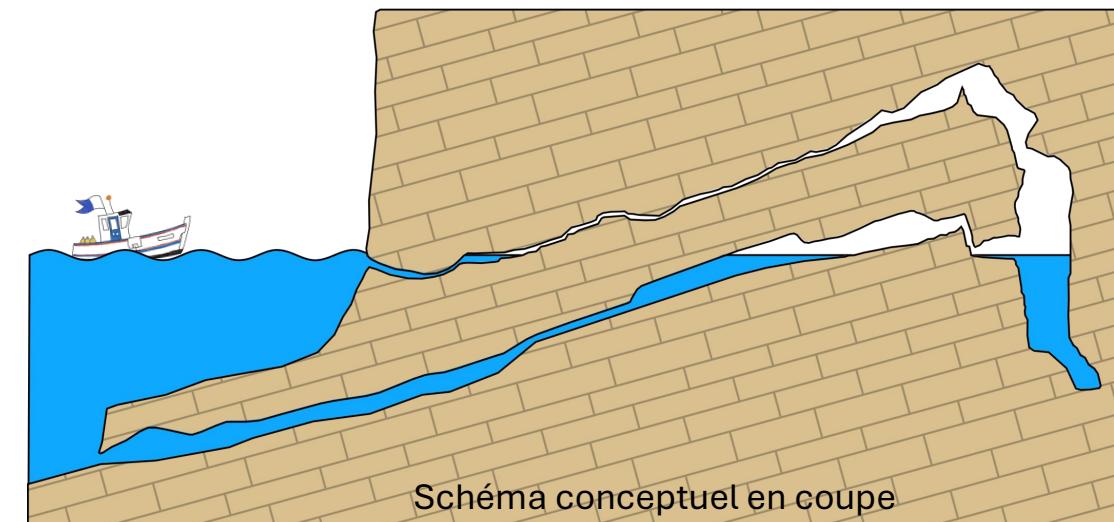
→ Vagues SE moins favorables : parallèles à la paroi



3^e étape : comparaison avec les données océanographiques – hauteur de la mer

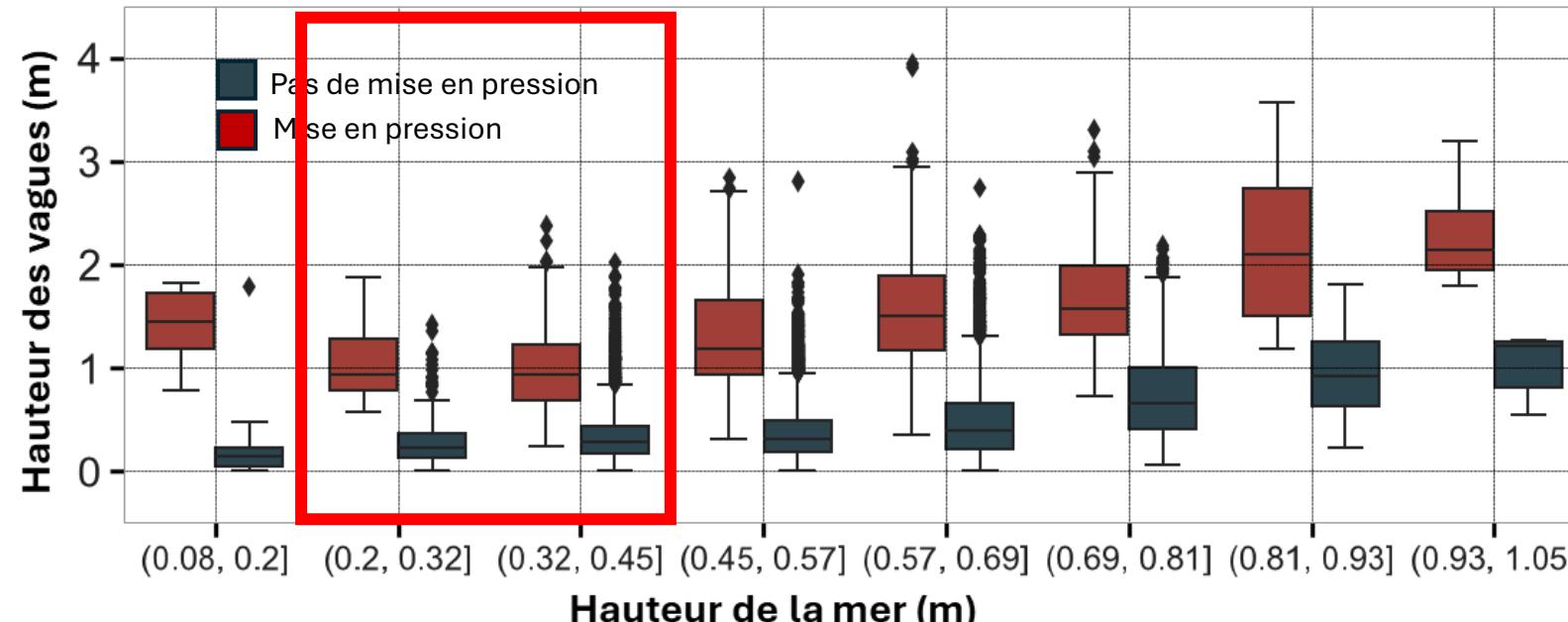


Mer haute associée à des vagues hautes (tempêtes)

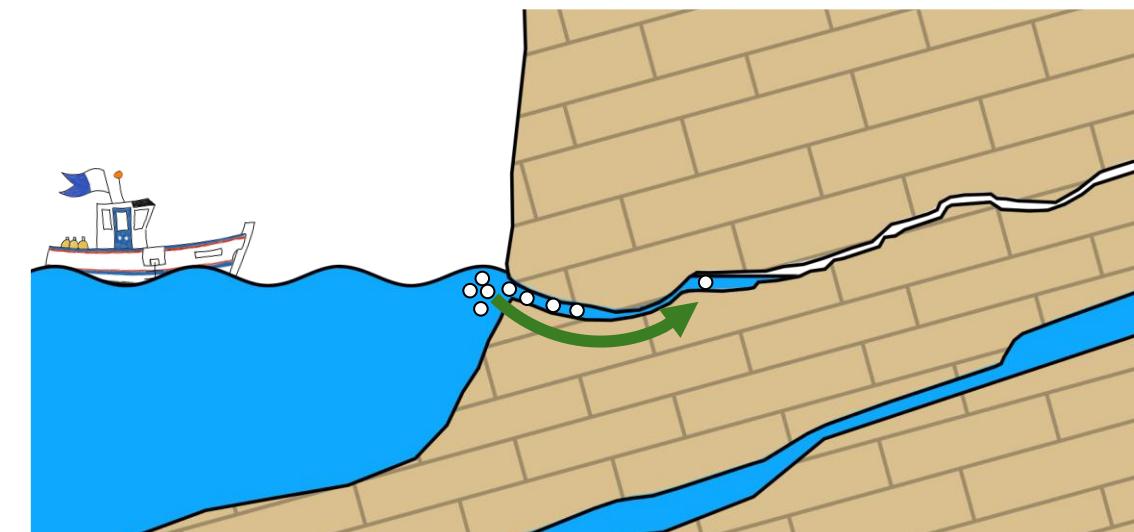


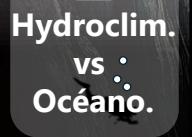


3^e étape : comparaison avec les données océanographiques – hauteur de la mer

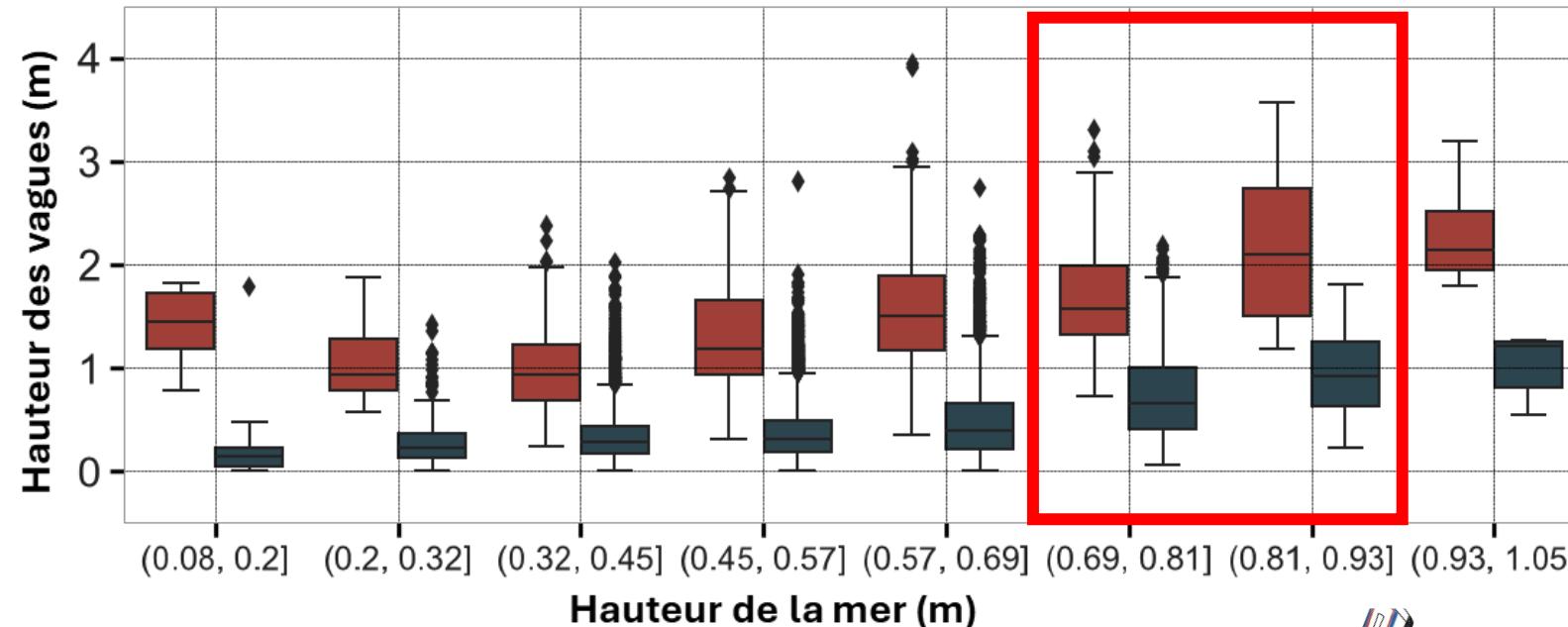


- Mer basse = vagues plus basses suffisantes pour faire entrer l'air**

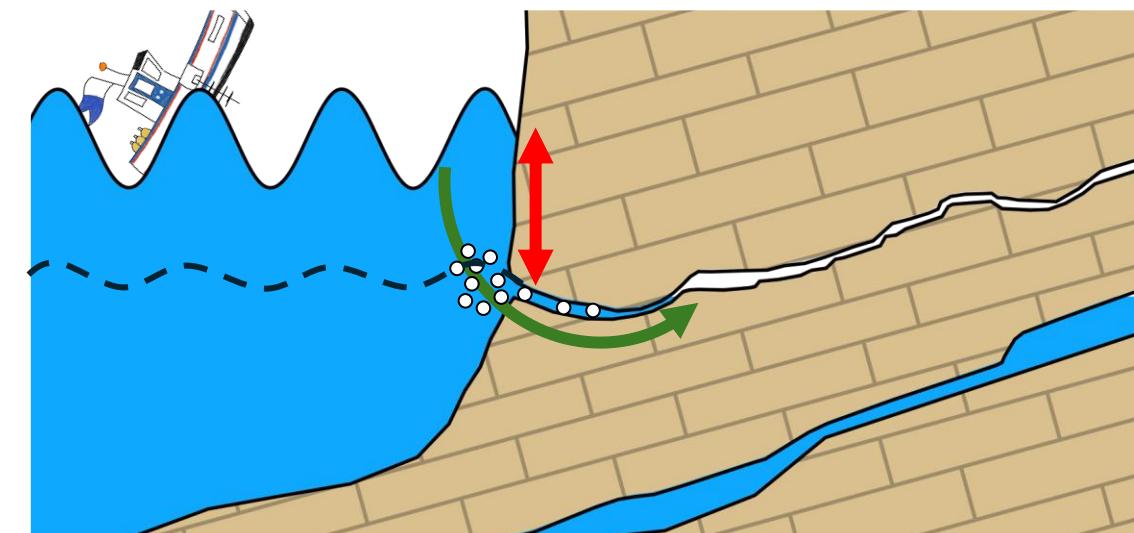




3^e étape : comparaison avec les données océanographiques – hauteur de la mer



- Mer basse = vagues plus basses suffisantes pour faire entrer l'air
- Hauteur minimale des vagues augmente avec la hauteur de la mer
- Les siphons sont plus profonds : les vagues doivent être plus hautes pour faire entrer l'air



Cas
d'étude



Matériel
et
données



1
Hydroclim.
et
perméa

2
Hydroclim.
vs
Océano.

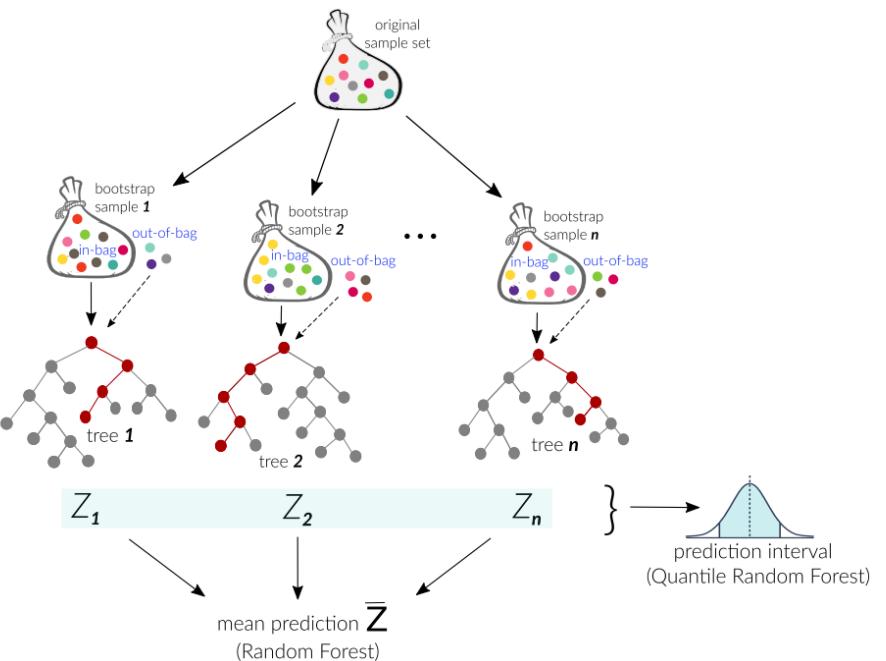
3
Niveaux
d'eau



Baisse des niveaux d'eau : approche statistique

Prédiction des évènements de mise en pression
à partir des conditions océanographiques

Modèle : Random Forest (Breiman, 2001)

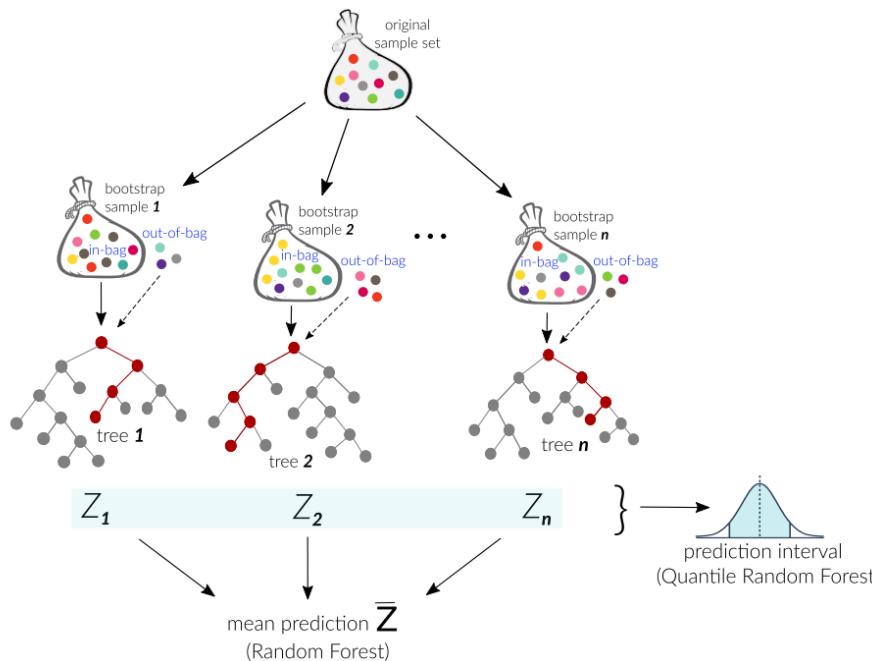




Baisse des niveaux d'eau : approche statistique

Prédiction des évènements de mise en pression à partir des conditions océanographiques

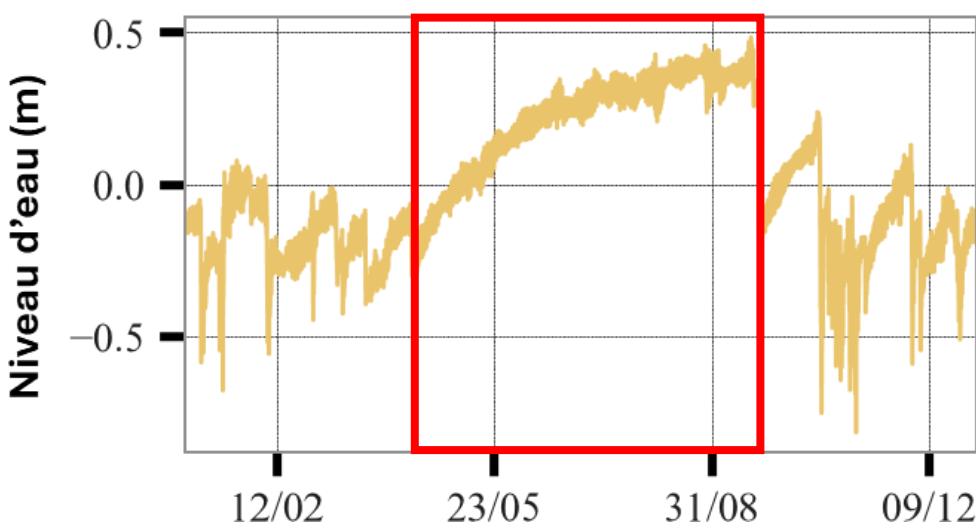
Modèle : Random Forest (Breiman, 2001)



Montée des niveaux d'eau : approche physique

Remontée estivale des plans d'eau

Solution de la forme : $h_w(t) = -\Delta h_w(t_0) e^{-\alpha t} + h_w(\infty)$

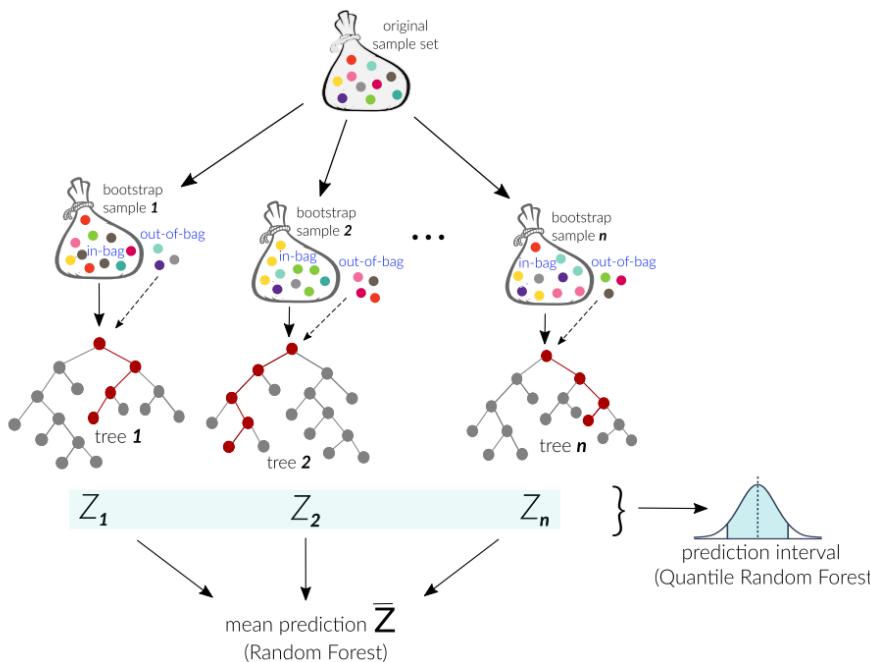




Baisse des niveaux d'eau : approche statistique

Prédiction des évènements de mise en pression à partir des conditions océanographiques

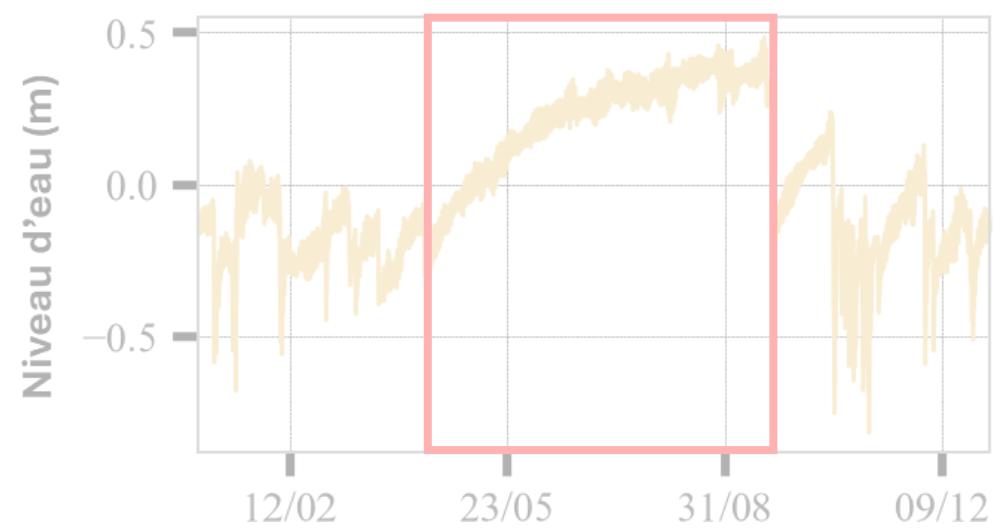
Modèle : Random Forest (Breiman, 2001)



Montée des niveaux d'eau : approche physique

Remontée estivale des plans d'eau

Solution de la forme : $h_w(t) = -\Delta h_w(t_0) e^{-\alpha t} + h_w(\infty)$





Baisse des niveaux d'eau : approche statistique

Données d'entrées

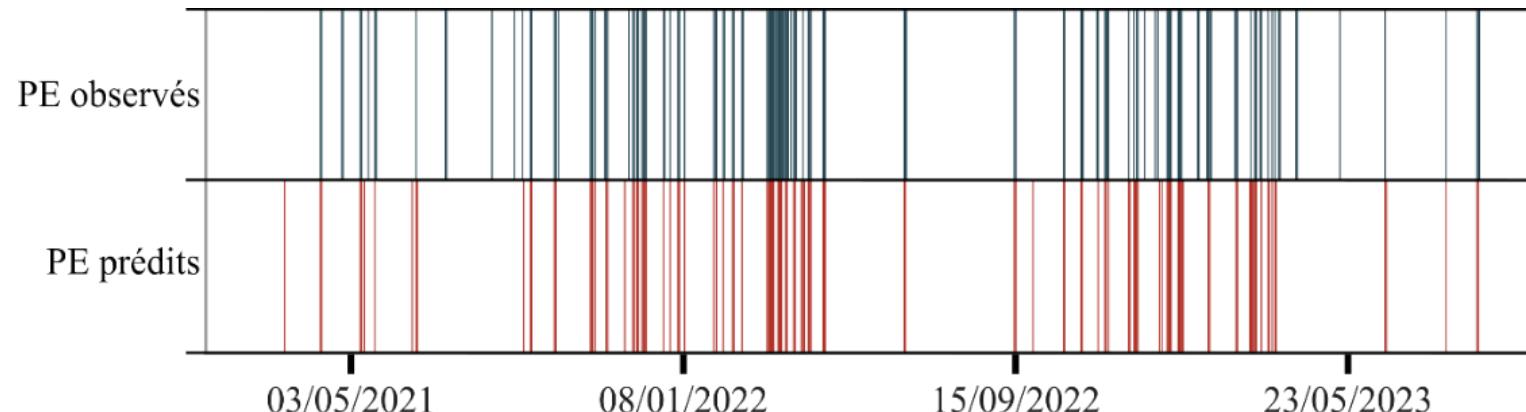
- Hauteur des vagues
- Direction des vagues
- Hauteur de la mer

Sortie du modèle Random Forest

PE : il y a un évènement de mise en pression aujourd'hui

\overline{PE} : il n'y a pas d'évènement de mise en pression aujourd'hui

Prédictions des jours avec évènements de mise en pression (PE) pour 2021-2023



Matrice de confusion

classes observée \ classes prédictée	PE	\overline{PE}
PE	0.7	0.3
\overline{PE}	0.028	0.97

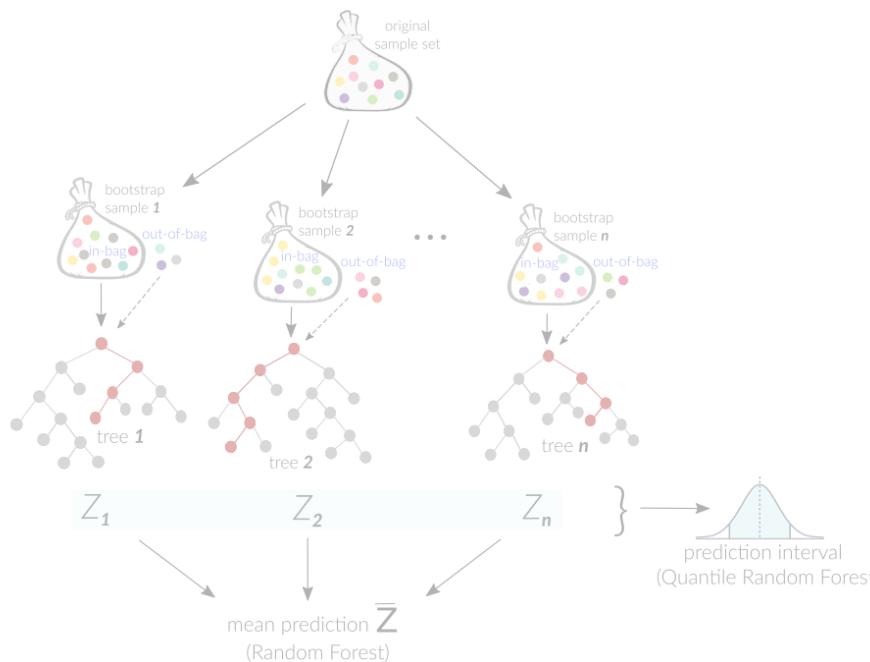
F1-score : 0,70



Baisse des niveaux d'eau : approche statistique

Prédiction des évènements de mise en pression à partir des conditions océanographiques

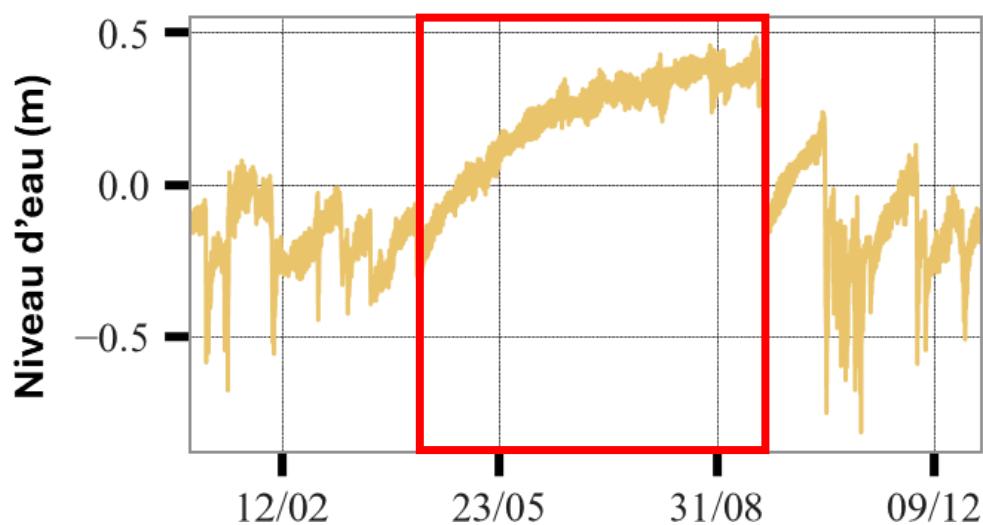
Modèle : Random Forest (Breiman, 2001)



Montée des niveaux d'eau : approche physique

Remontée estivale des plans d'eau

Solution de la forme : $h_w(t) = -\Delta h_w(t_0) e^{-\alpha t} + h_w(\infty)$





Montée des niveaux d'eau : approche physique

Gaz parfait

$$n(t) = \frac{P_a}{RT_a} [V_0 + S_w(h_0 - h_w(t))]$$

Darcy

$$Q_n = -\frac{k_a}{RT\mu_a(T)} \frac{A}{L} P_0 \Delta P$$



Equation différentielle d'ordre 1

$$\frac{d\Delta P}{dt} \left[\frac{V_0}{P_0} + \frac{S_w}{\rho_{sea}g} \right] + \frac{\lambda_a}{\mu_a} \Delta P = 0$$

Influence de la remontée des plans d'eau

- Durée sans évènement de mise en pression
- Niveau d'eau max = niveau moyen de la mer
- Perméabilité du massif
- Niveau d'eau initial

Solution

$$\Delta P(t) = \Delta P(t_0) e^{-\alpha t} + P_0$$



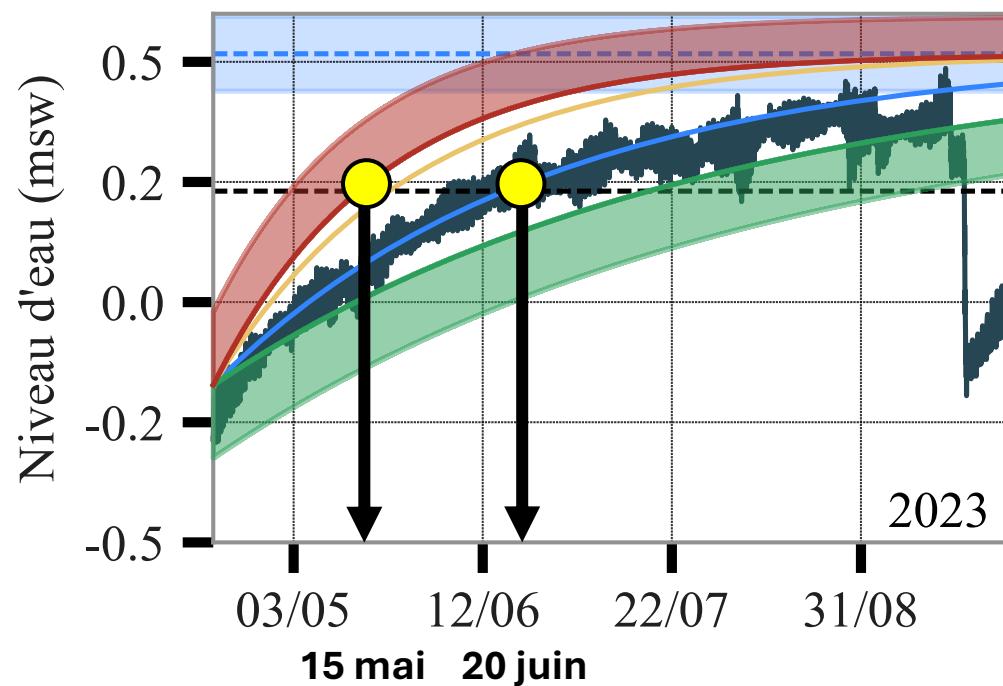
$$h_w(t) = -\Delta h_w(t_0) e^{-\alpha t} + h_w(\infty)$$



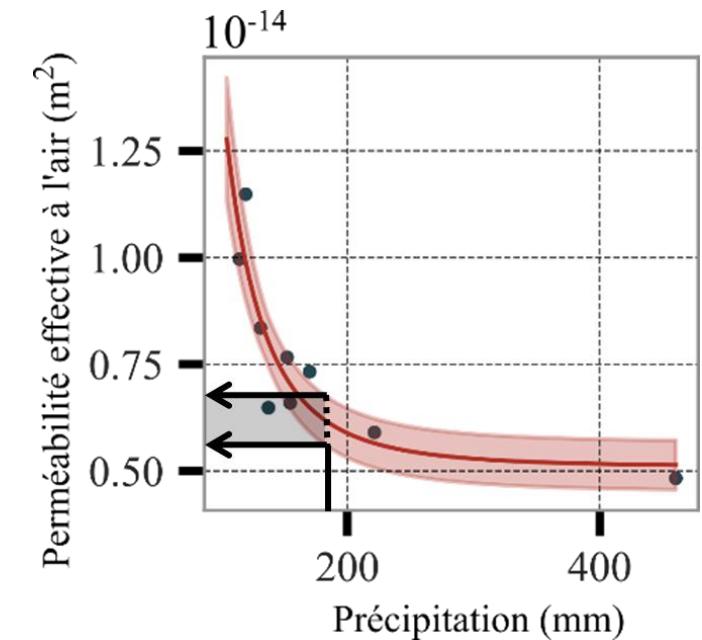
Montée des niveaux d'eau : approche physique

Influence de la remontée des plans d'eau

- Durée sans évènement de mise en pression
- Niveau d'eau max = niveau moyen de la mer
- Perméabilité du massif
- Niveau d'eau initial



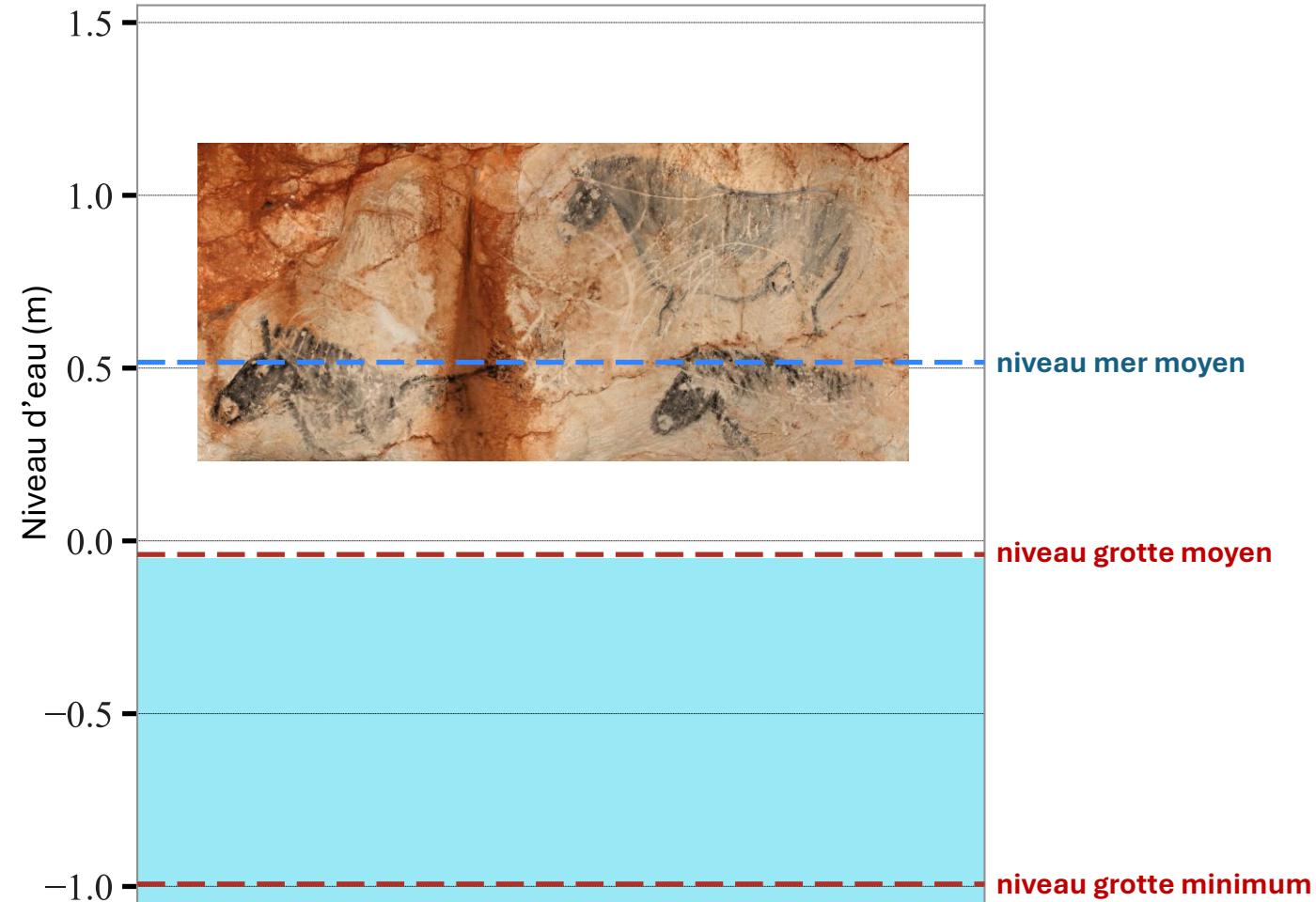
Sècheresse
Sec
Humide
Pluvieux



Remontée très rapide des
niveaux d'eau les années sèches



Contexte de changement climatique



Cas
d'étude



Matériel
et
données

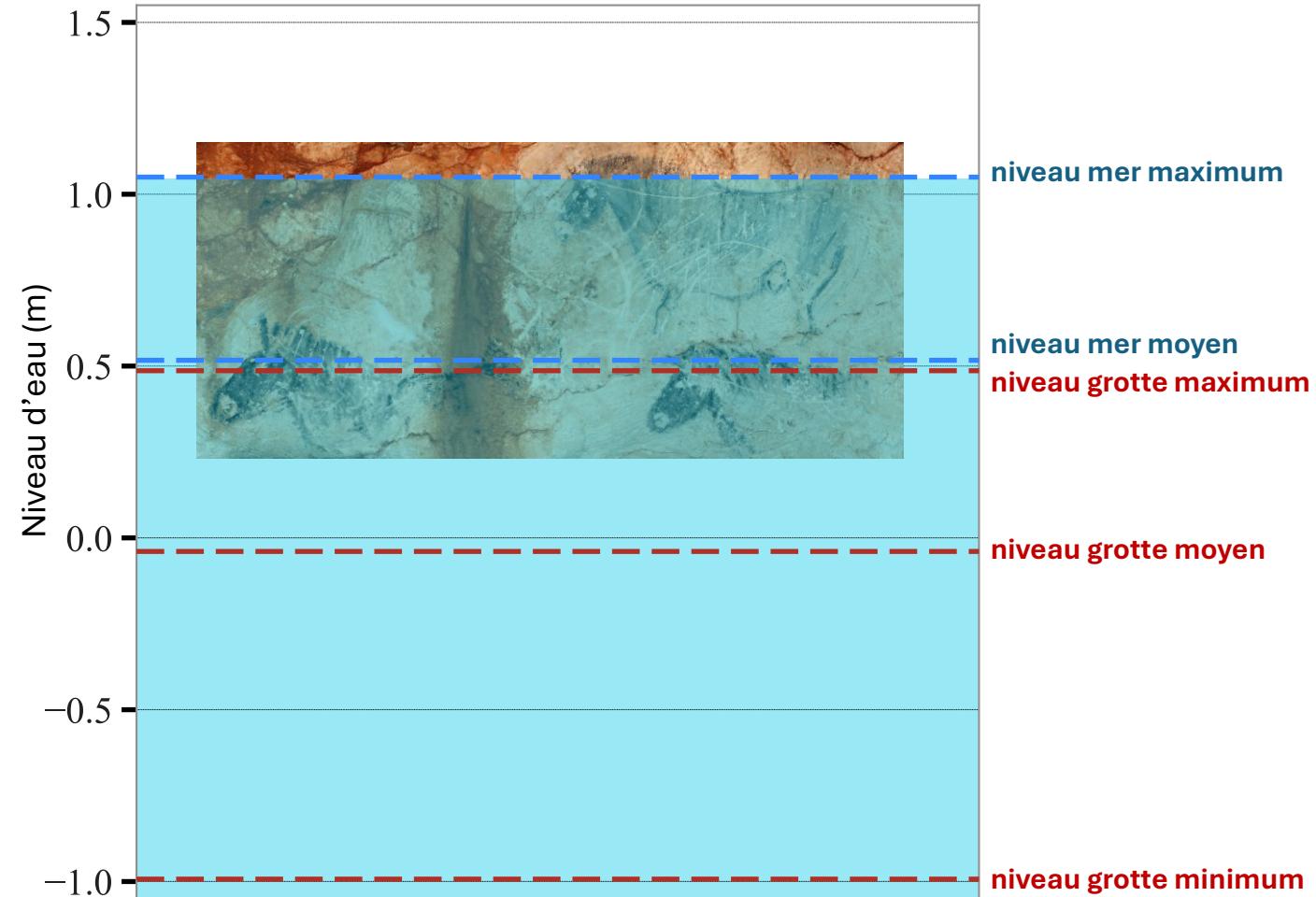


1
Hydroclim.
et
perméa

2
Hydroclim.
vs
Océano.

3
Niveaux
d'eau

Contexte de changement climatique

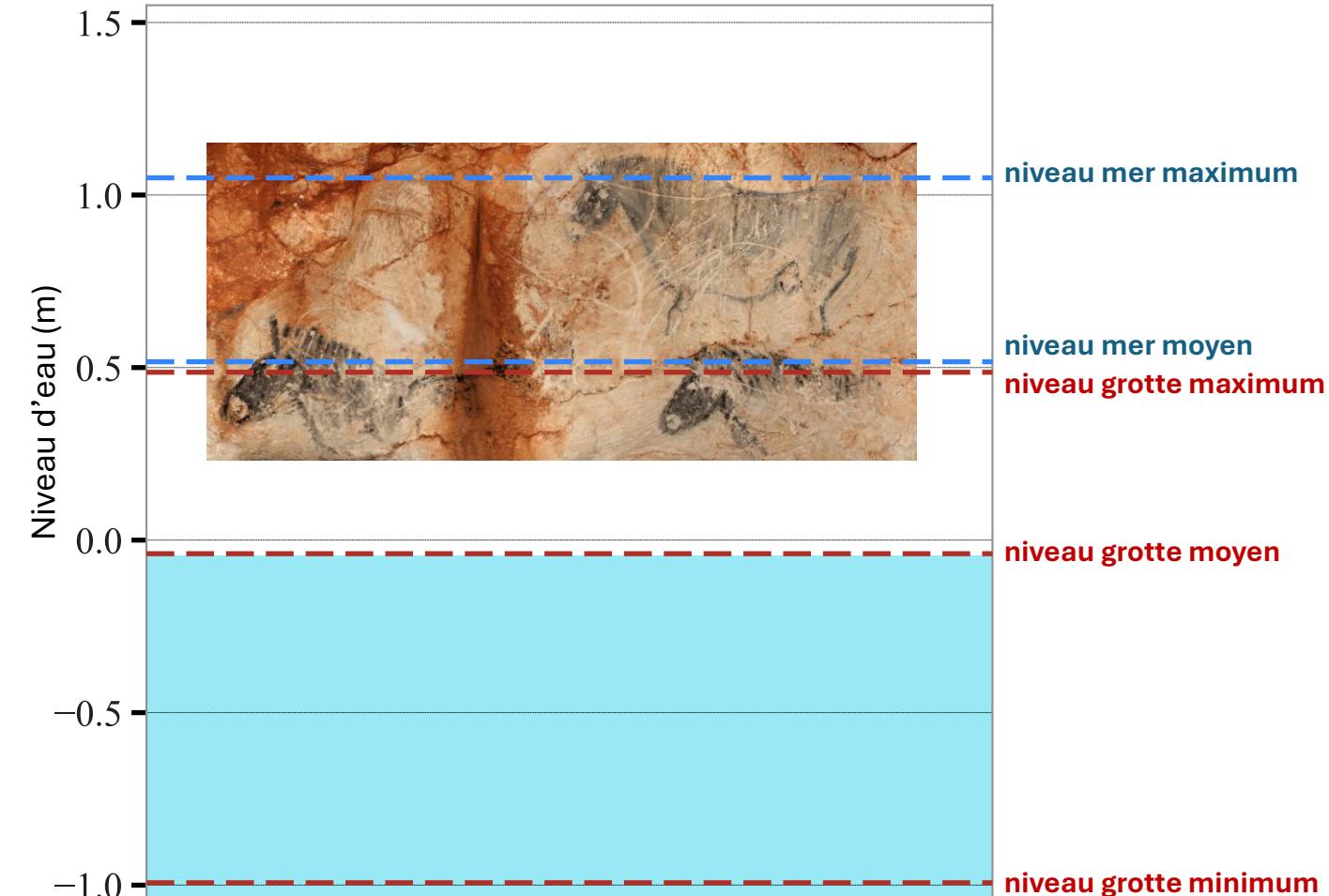




Contexte de changement climatique

- **Elévation du niveau de la mer**
- **Pas d'augmentation de hauteur des vagues**
- **Sécheresses plus intenses**

- **Moins d'évènements de mise en pression**
- **Périodes d'ennoiement plus longues**
- **Niveau maximum plus élevé**

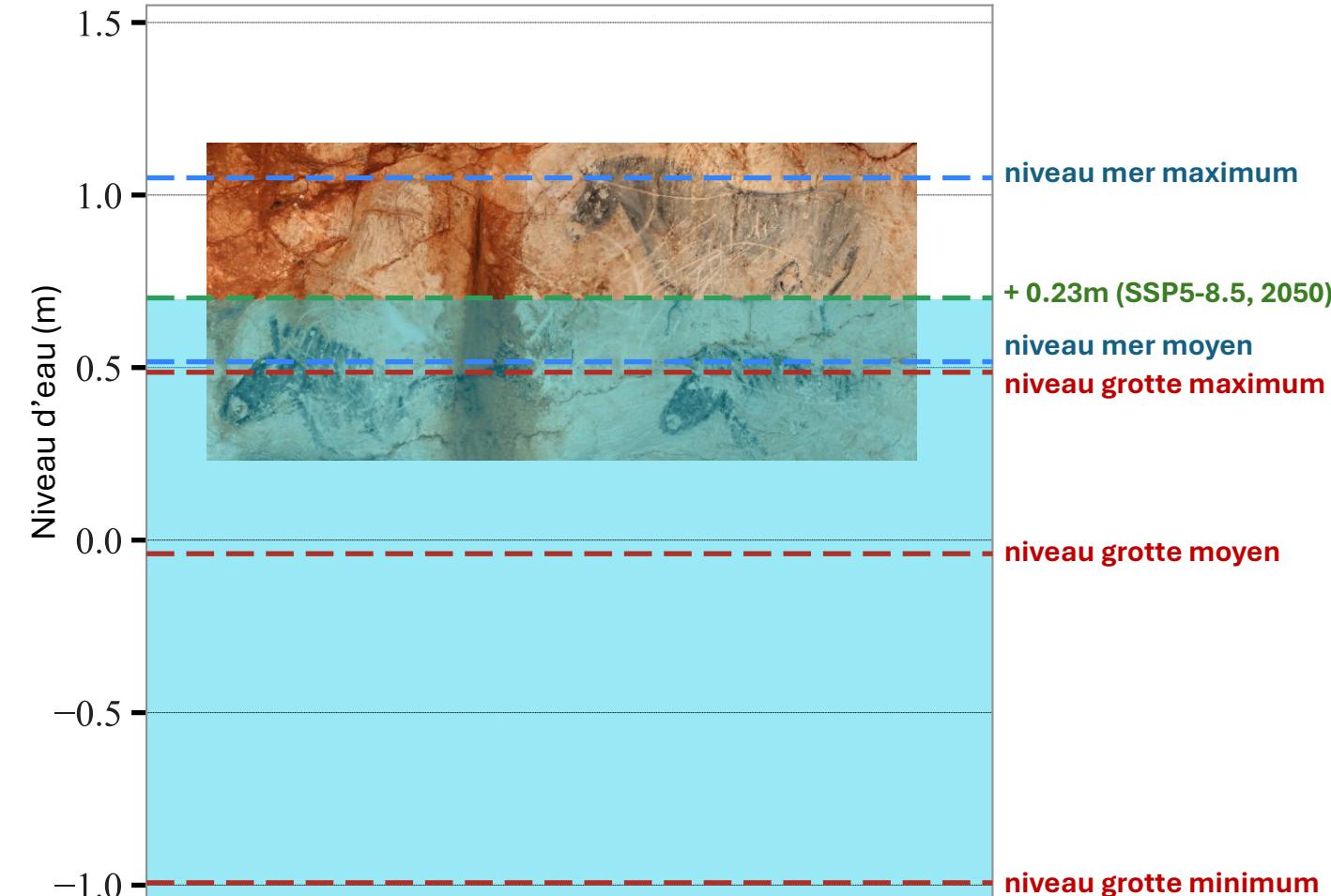


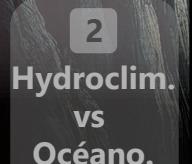
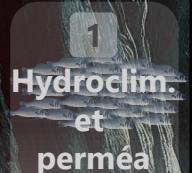


Contexte de changement climatique

- **Elévation du niveau de la mer**
- **Pas d'augmentation de hauteur des vagues**
- **Sécheresses plus intenses**

- **Moins d'évènements de mise en pression**
 → **Périodes d'ennoiement plus longues**
 → **Niveau maximum plus élevé**

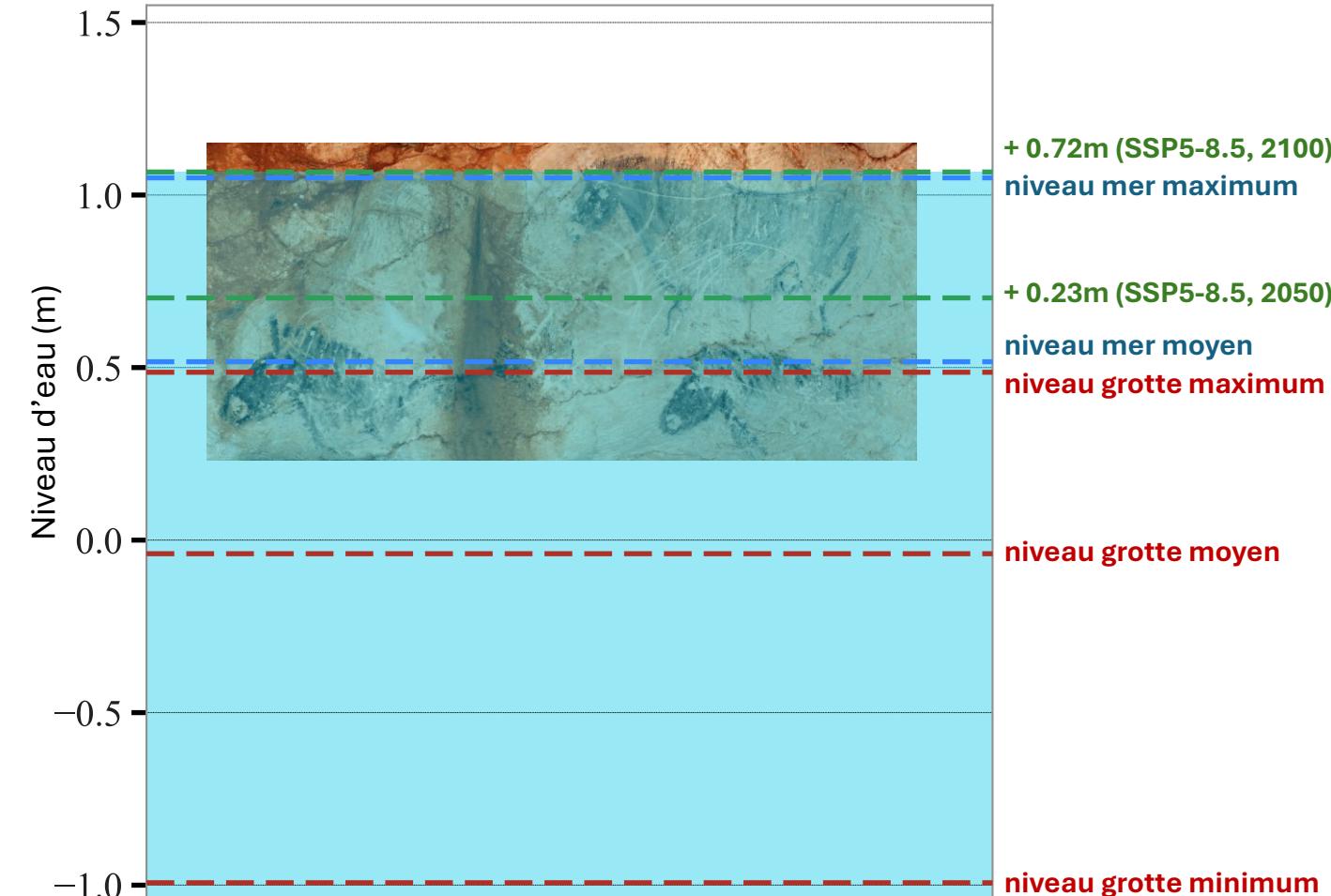




Contexte de changement climatique

- **Elévation du niveau de la mer**
- **Pas d'augmentation de hauteur des vagues**
- **Sécheresses plus intenses**

- **Moins d'évènements de mise en pression**
- **Périodes d'ennoiement plus longues**
- **Niveau maximum plus élevé**



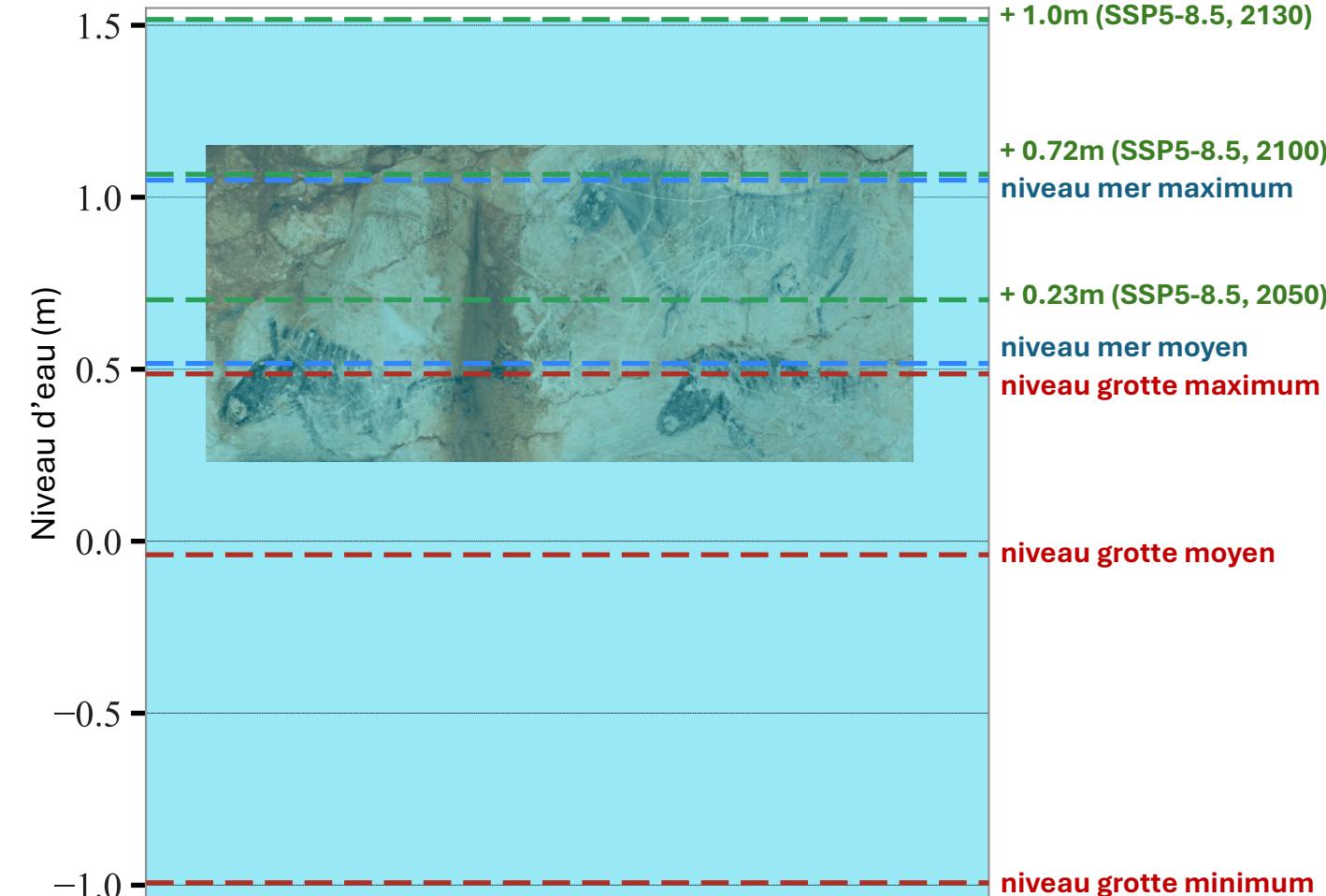


Contexte de changement climatique

- **Elévation du niveau de la mer**
- **Pas d'augmentation de hauteur des vagues**
- **Sécheresses plus intenses**

- **Moins d'évènements de mise en pression**
- **Périodes d'ennoiement plus longues**
- **Niveau maximum plus élevé**

Urgence d'étudier la grotte



Conclusion : fonctionnement hydroclimatique

69

Cas d'étude



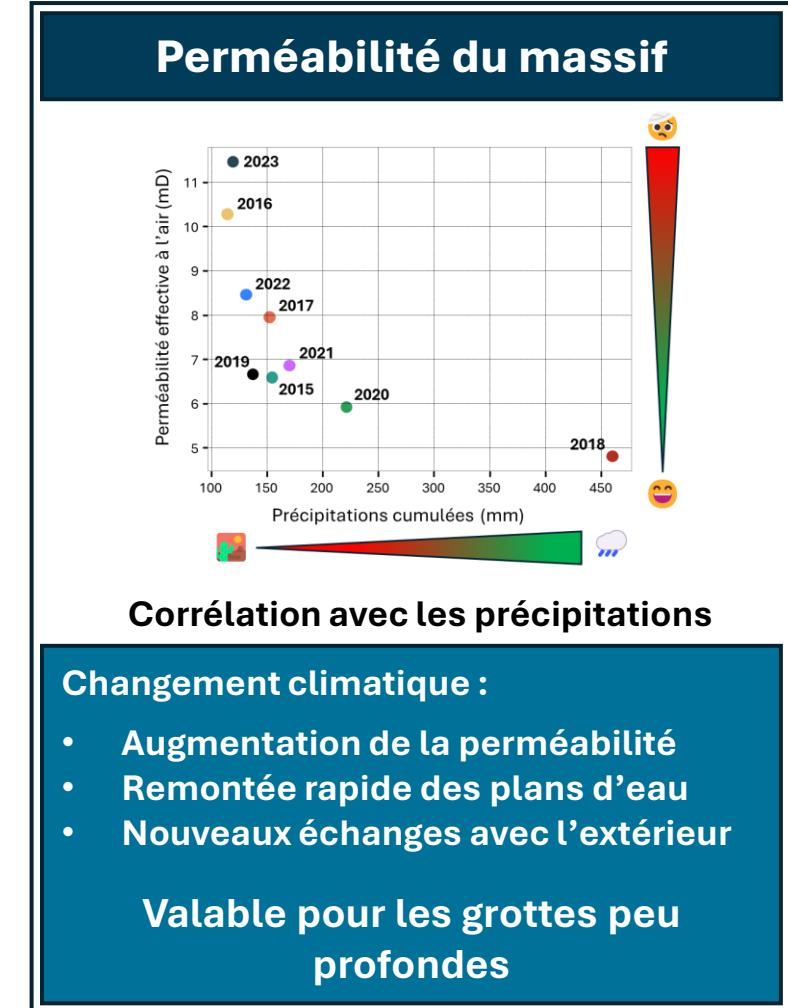
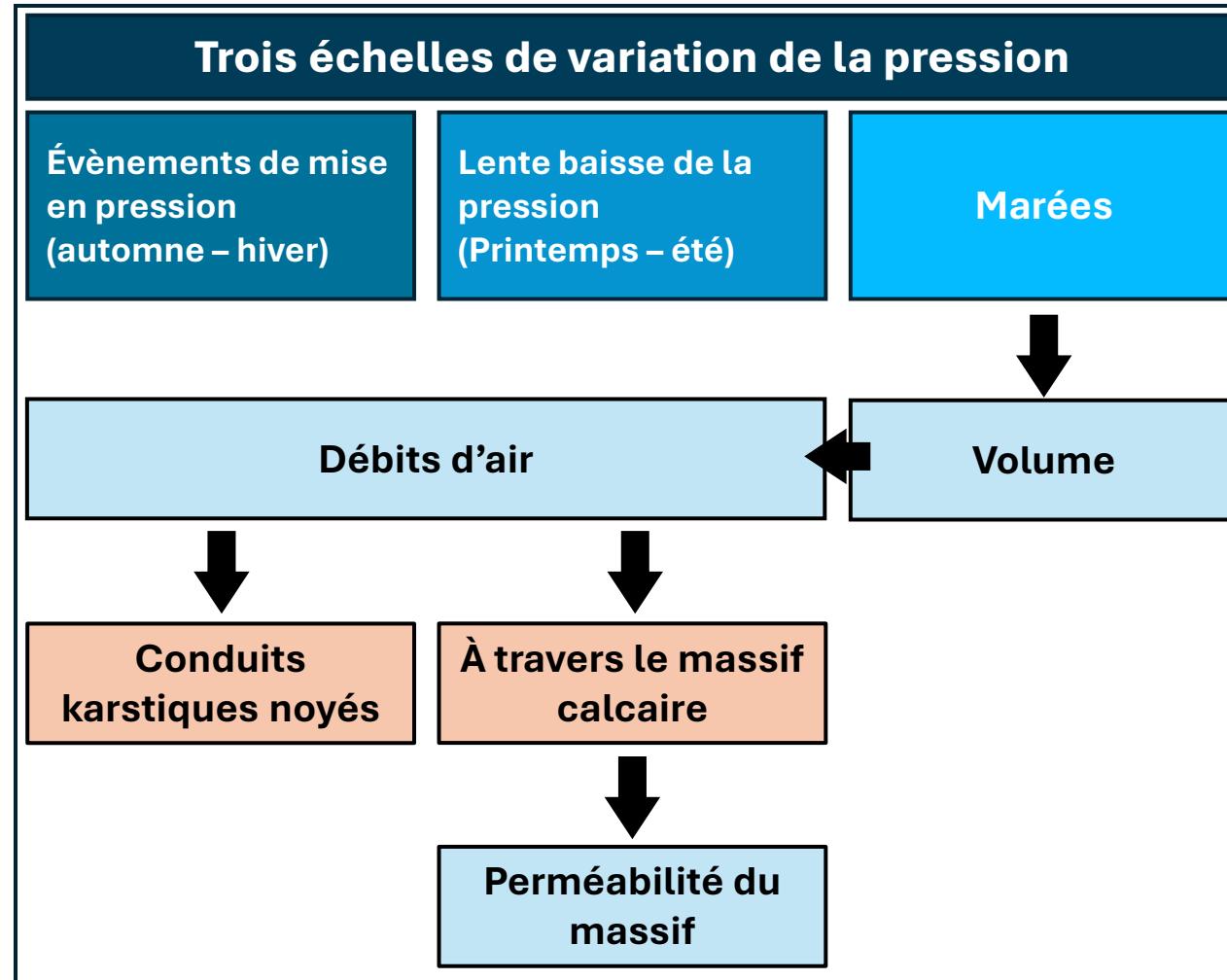
Matériel et données

1 Hydroclim et perméa

2 Hydroclim. vs Océano.

3 Niveaux d'eau

Conclusion



Conclusion : conditions océanographiques

70

Cas d'étude



Matériel et données

1 Hydroclim. et perméa

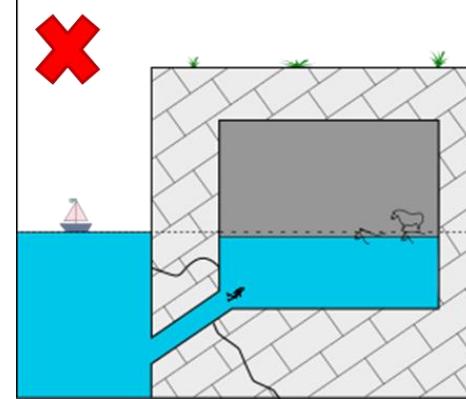
2 Hydroclim. vs Océano.

3 Niveaux d'eau

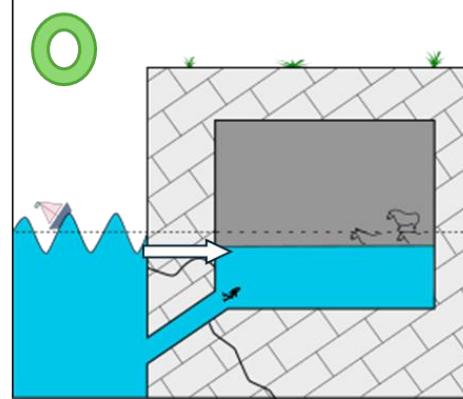
Conclusion

Hauteur des vagues : moteur des mises en pression

Pas de vagues

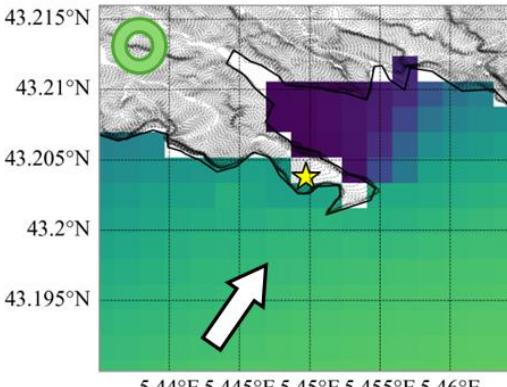


Vagues

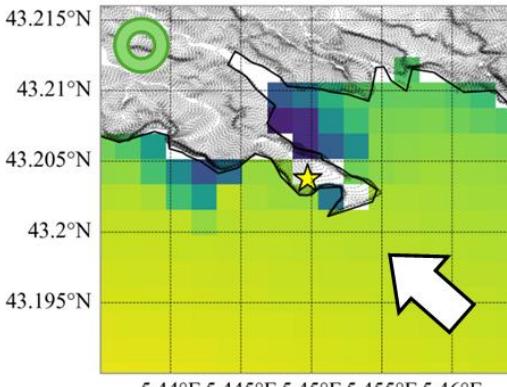


Direction des vagues

Direction SO

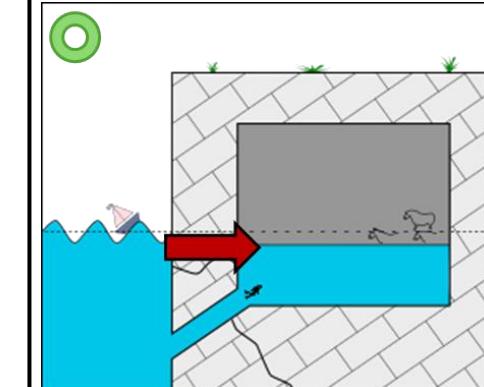


Direction SE

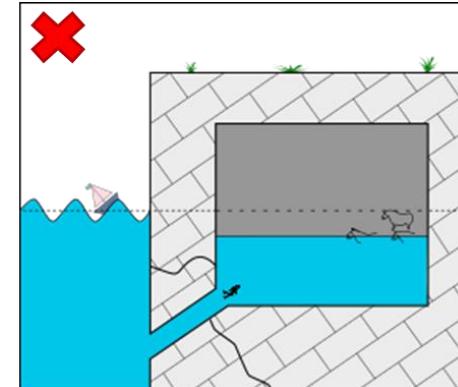


Hauteur de la mer

Mer basse



Mer haute

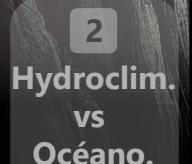
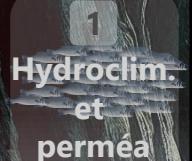


Conclusion : niveaux d'eau

Cas d'étude



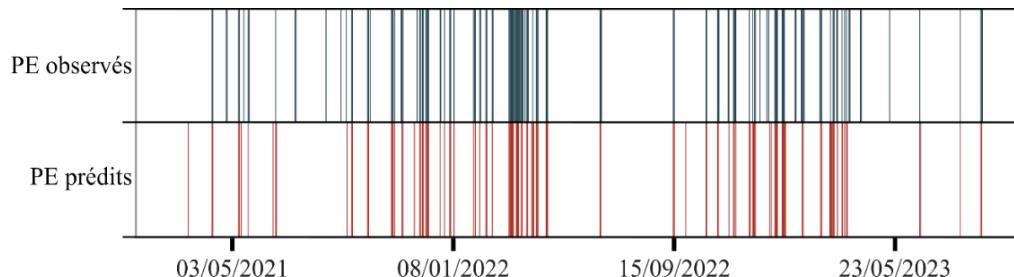
Matériel et données



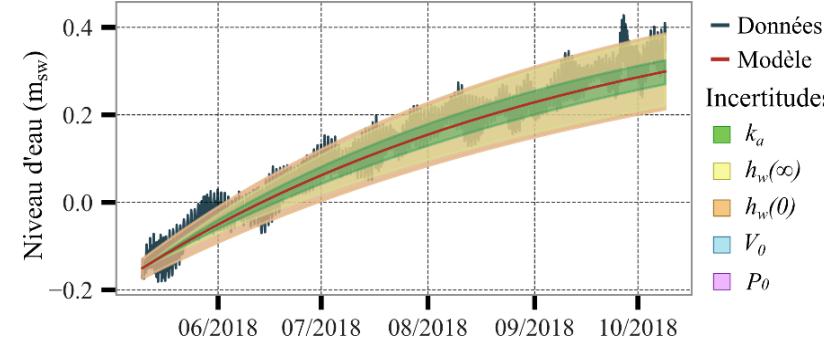
Niveaux d'eau

Conclusion

Modèle statistique des baisses des plans d'eau

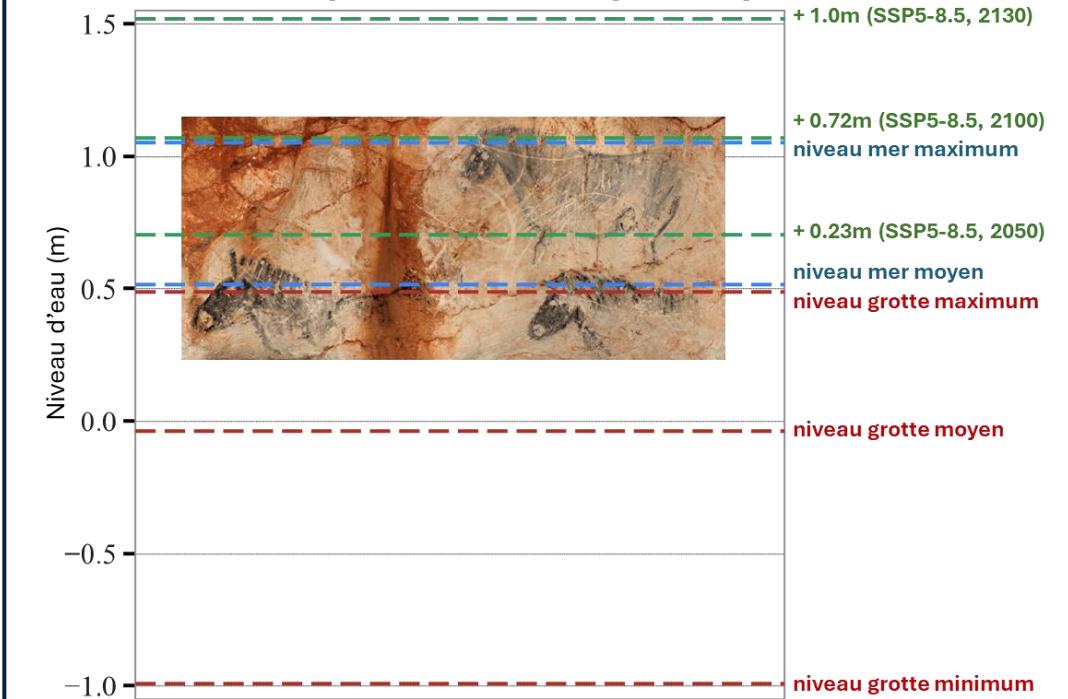


Modèle physique de la remontée des plans d'eau

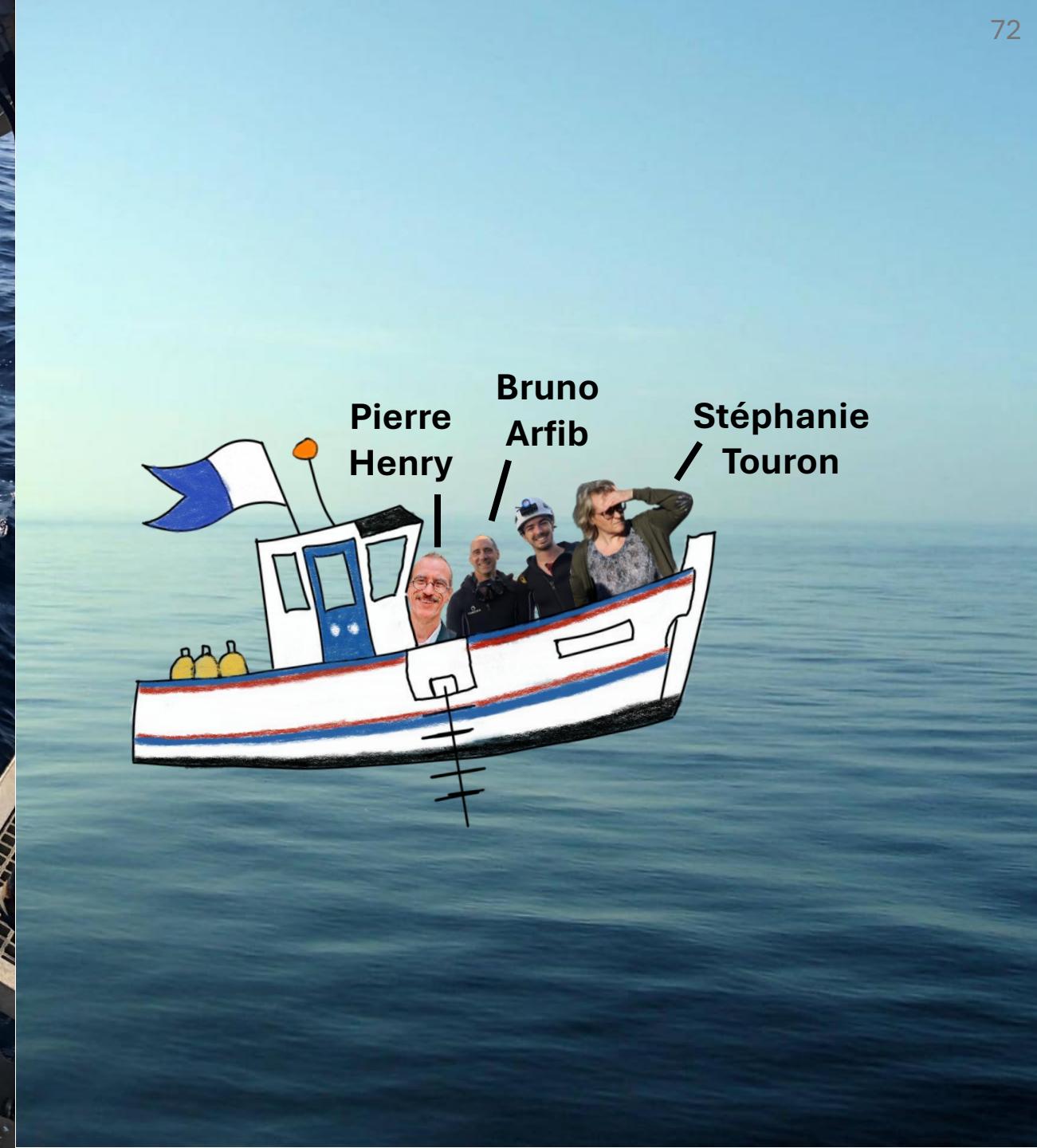


Changement climatique

- Sécheresses plus fréquentes et longues**
- Élévation du niveau marin**
- Remontées plus hautes et plus rapides**

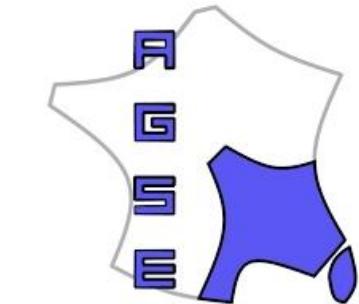


- Estimer les niveaux d'eau sans déplacement sur le site, mais ne remplacent pas les observations in situ**
- Aider à planifier les missions archéologiques**
- Aider à décider des mesures de conservation**





Frédéric Perrier
Frédéric Girault



Merci pour
votre attention