

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

Contexte



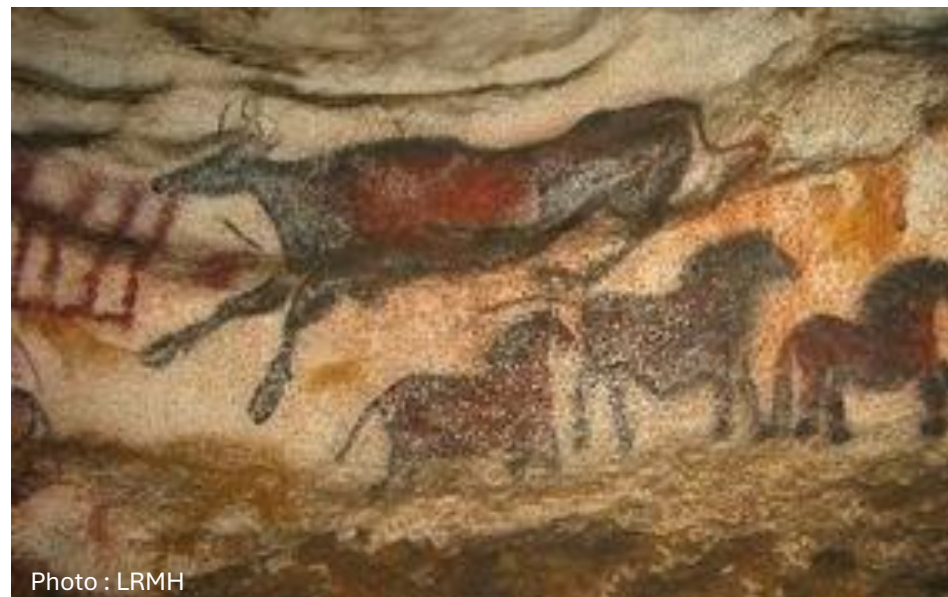
Grotte de Bruniquel : 176 500 ans



Grotte Chauvet : 36 000 ans



Grotte de Lascaux : 23 000 ans



Grotte du Pech-Merle : 16 000 ans



Contexte



Massif des Calanques

Karst : paysage formé par la dissolution de roches solubles

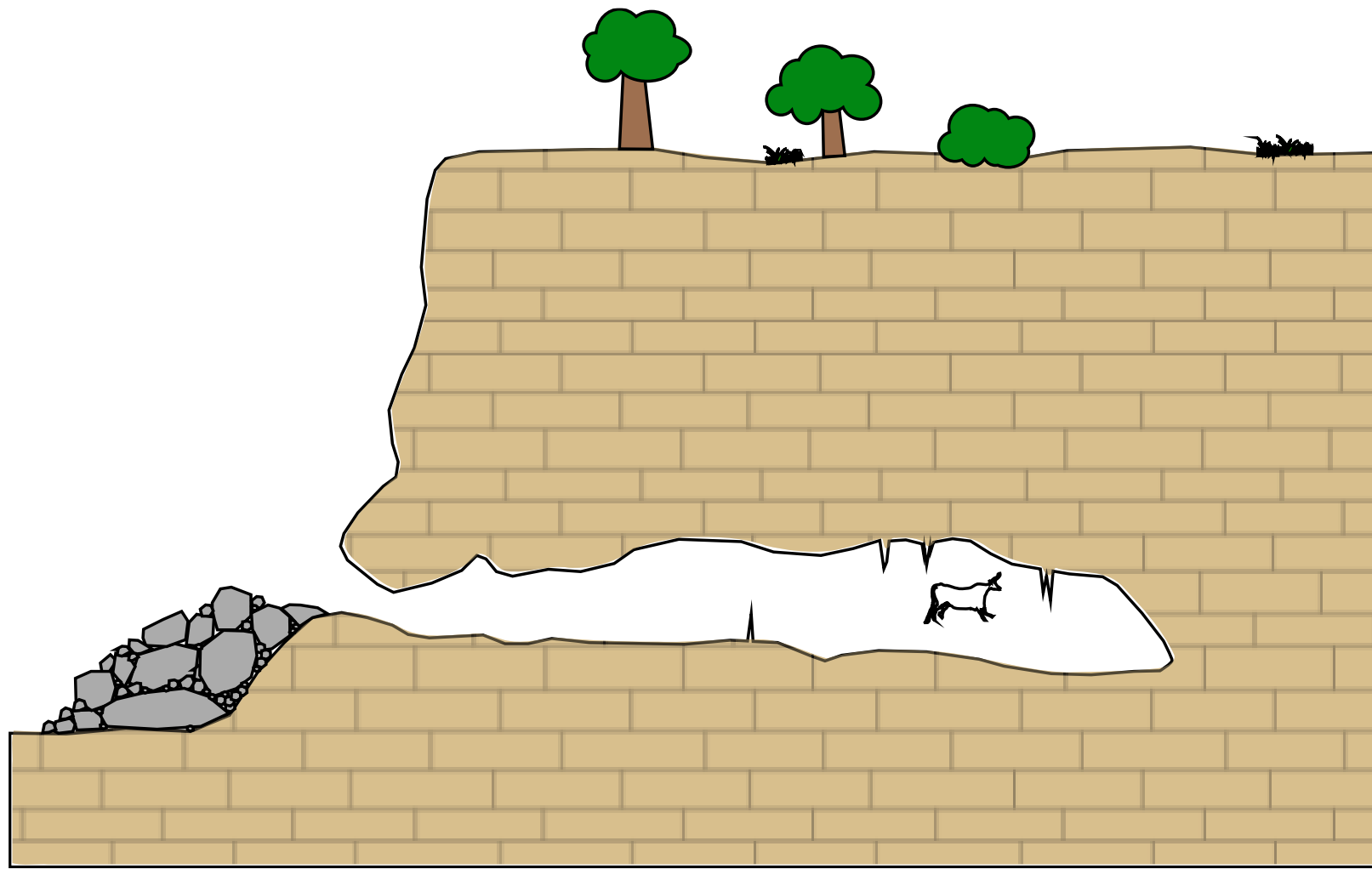


Les grottes : échanges avec leur environnement



Contexte

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



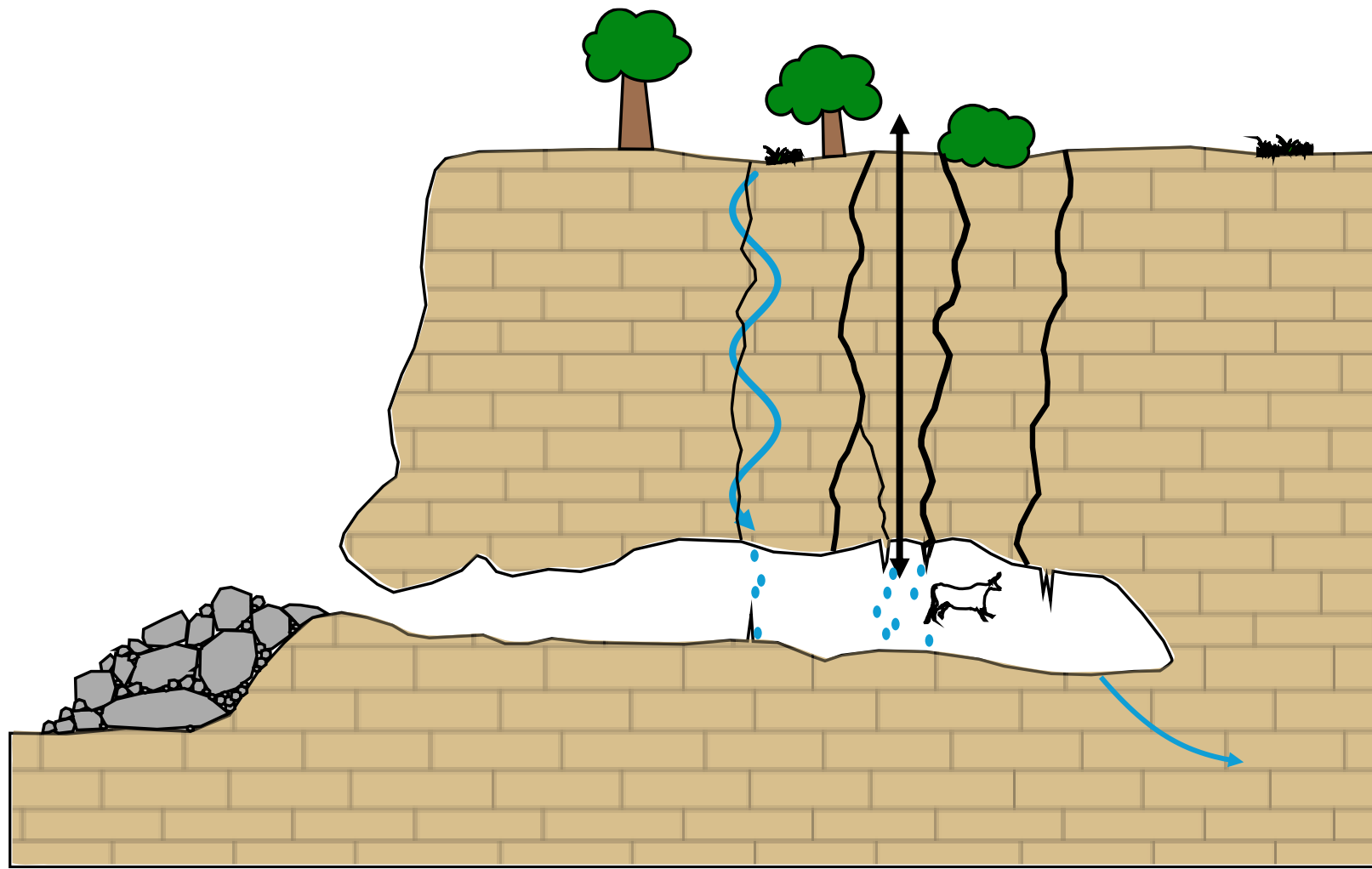
Les grottes : échanges avec leur environnement

Contexte

Massif carbonaté karstique

- Porosité
- Perméabilité

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



Les grottes : échanges avec leur environnement

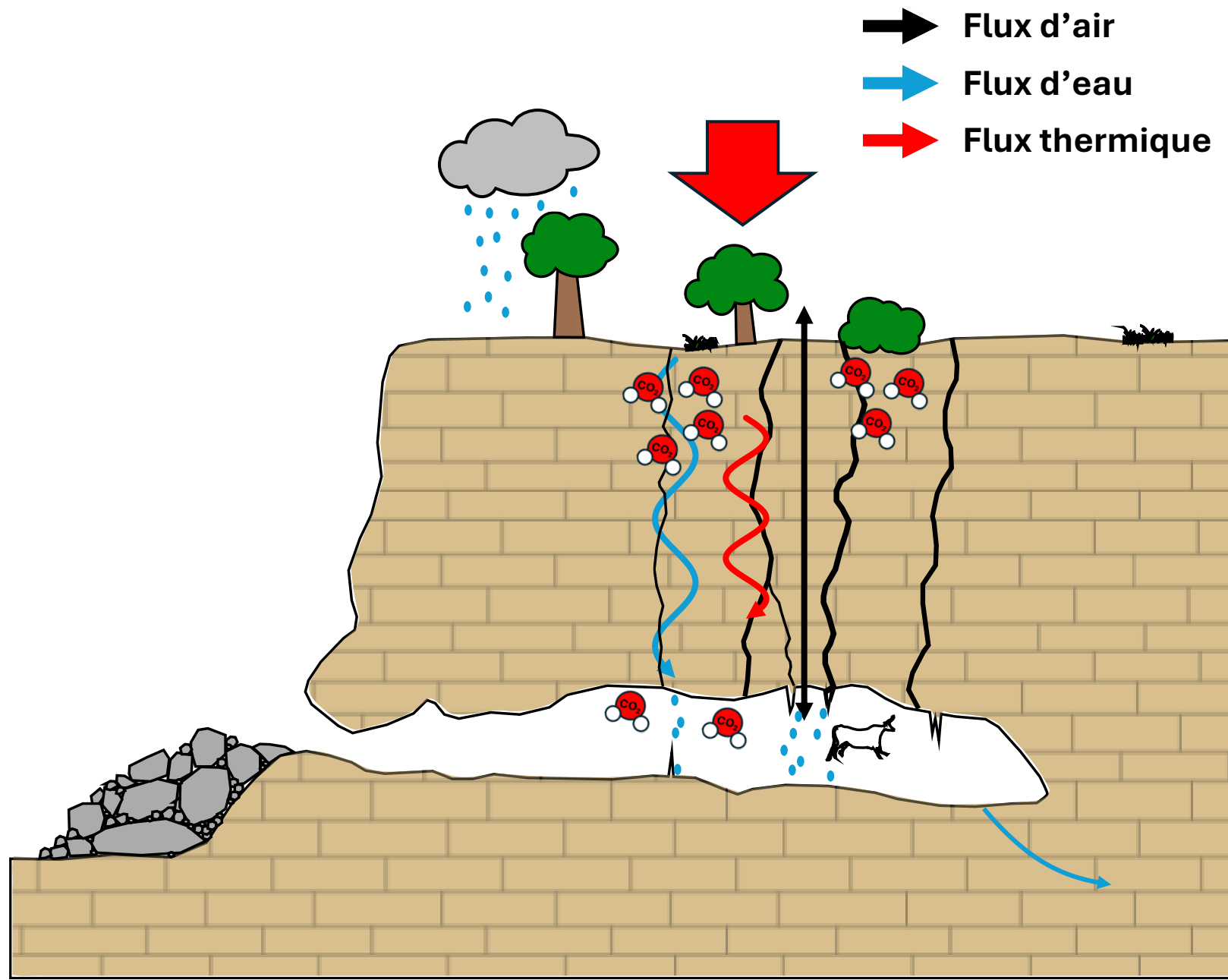
Contexte

Massif carbonaté karstique

- Porosité
- Perméabilité

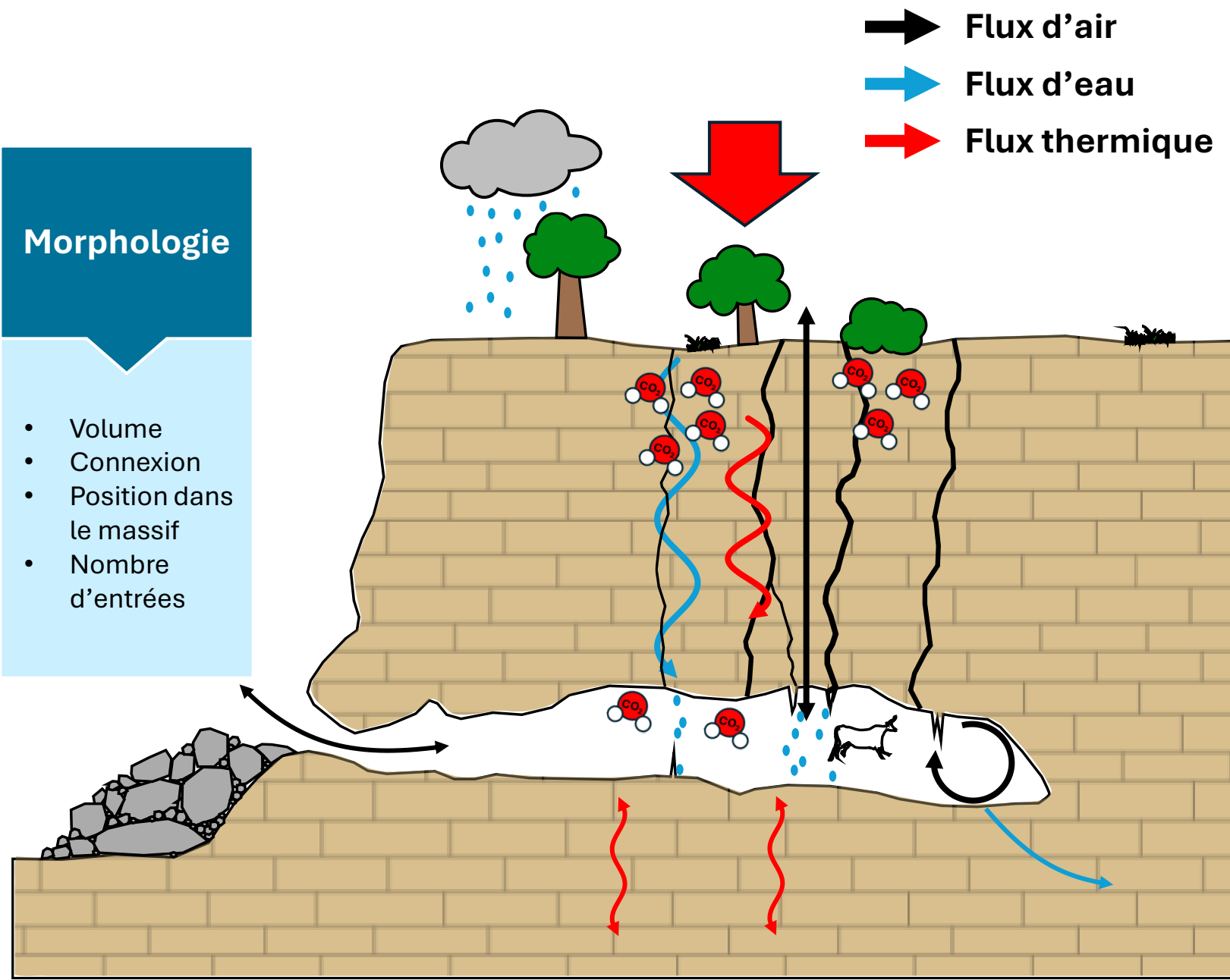
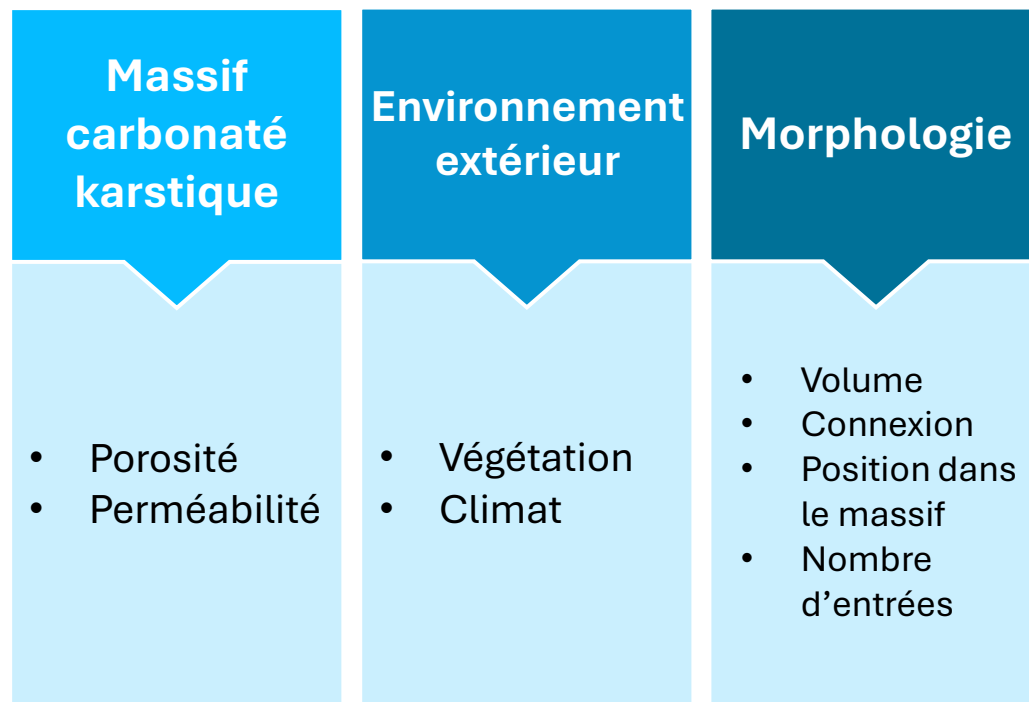
Environnement extérieur

- Végétation
- Climat



Les grottes : échanges avec leur environnement

Contexte



Les grottes : échanges avec leur environnement

Contexte



Massif carbonaté karstique

- Porosité
- Perméabilité

Environnement extérieur

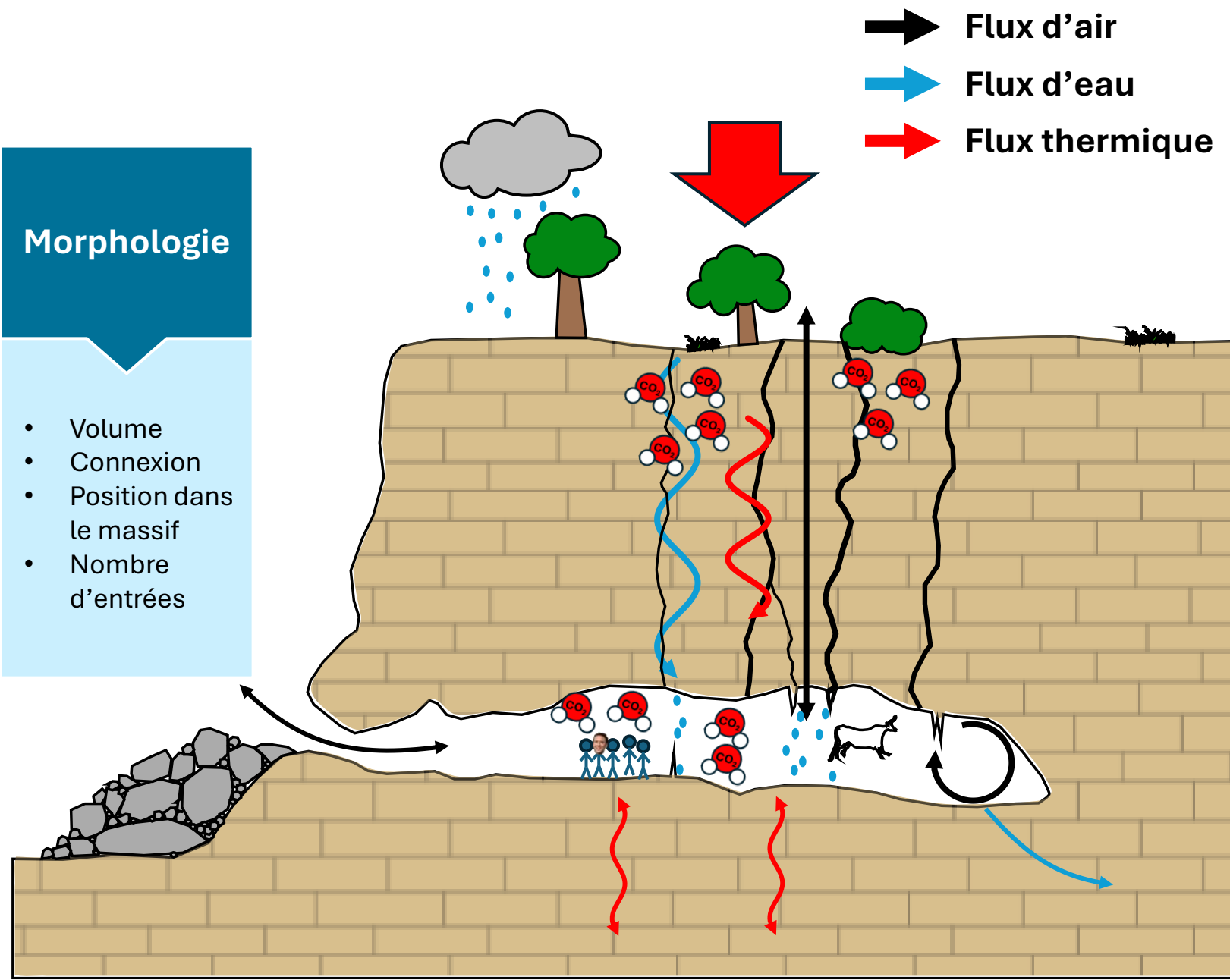
- Végétation
- Climat

Morphologie

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

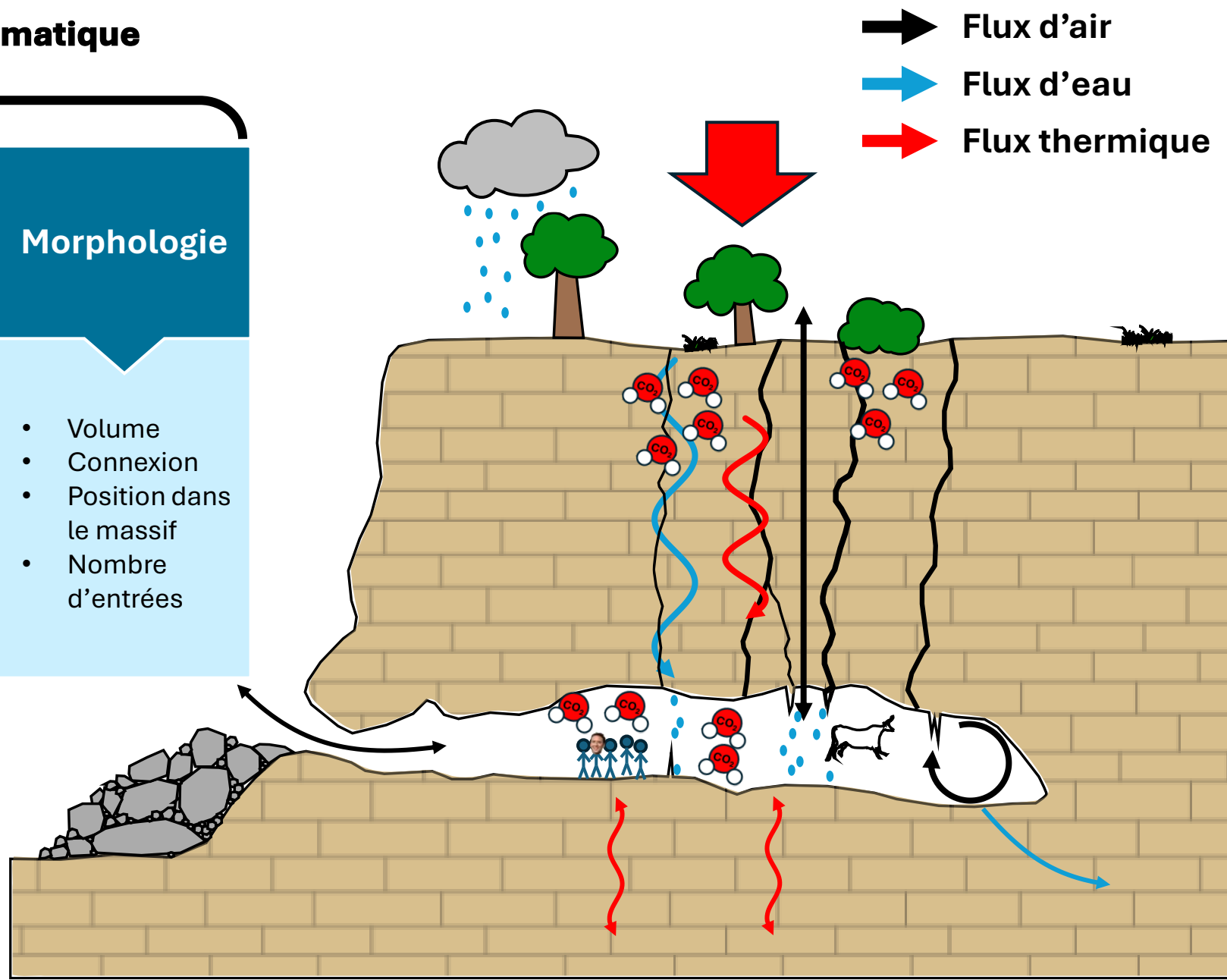
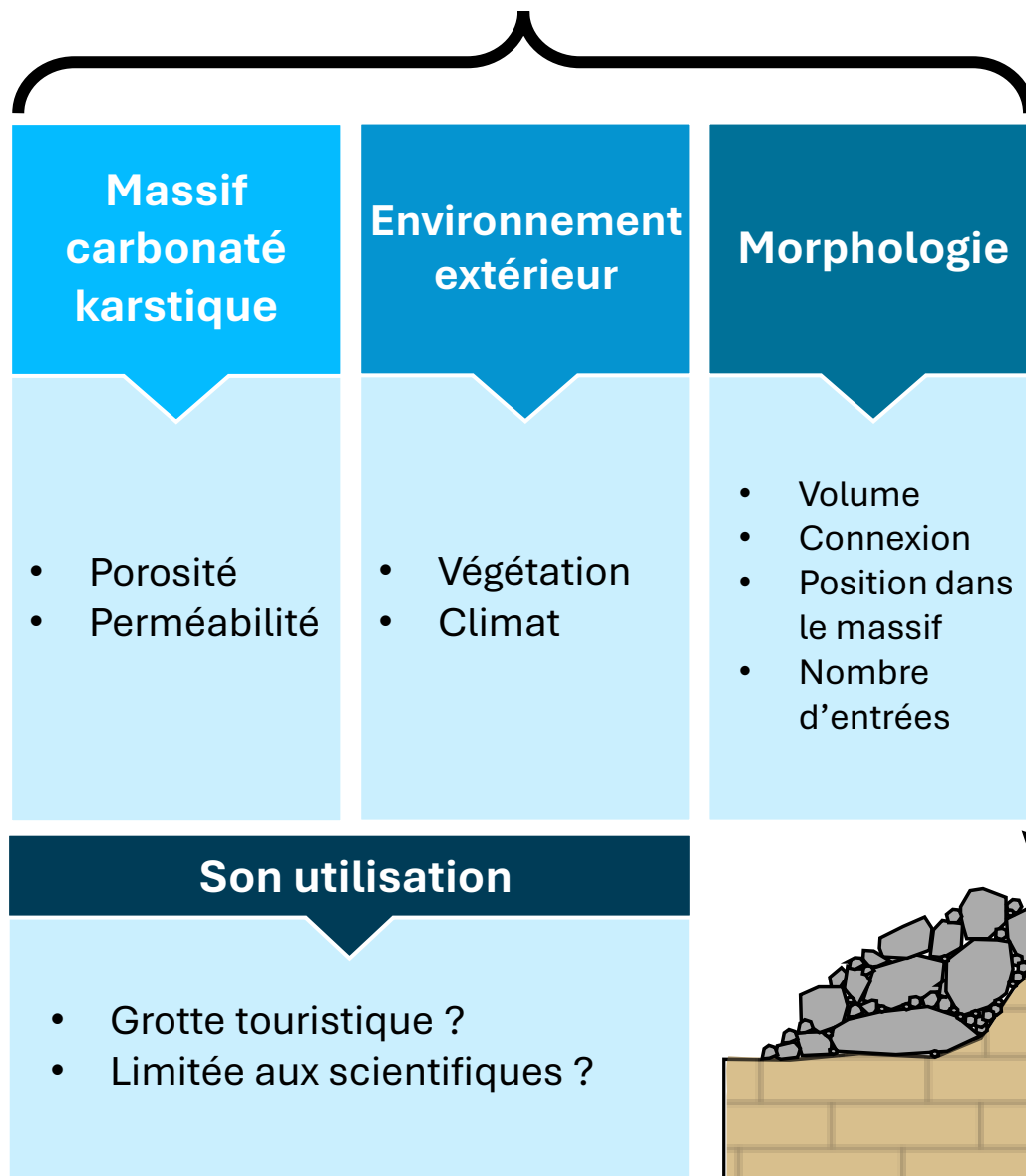
Son utilisation

- Grotte touristique ?
- Limitée aux scientifiques ?



Contexte

Fonctionnement hydroclimatique



Contexte



Paramètres suivis

- Température (air et parois)
- Pression barométrique
- Hygrométrie
- Profil CO_2/O_2
- Radon
- Pluviométrie
- Particules minérales
- Suivi photographique
- Suivi biologique ...

Bourges *et al.* 2020

Frouin et Touron 2022

Saez *et al.* 2021

Leplat *et al.* 2019

Ponctuel



(Cosquer)



Photo : S. Touron

Continu



Photo : Frouin et Touron (2021)



A (Font de Gaume)

Stabilité des paramètres = bonne conservation

→ Équilibre fragile avec l'environnement proche

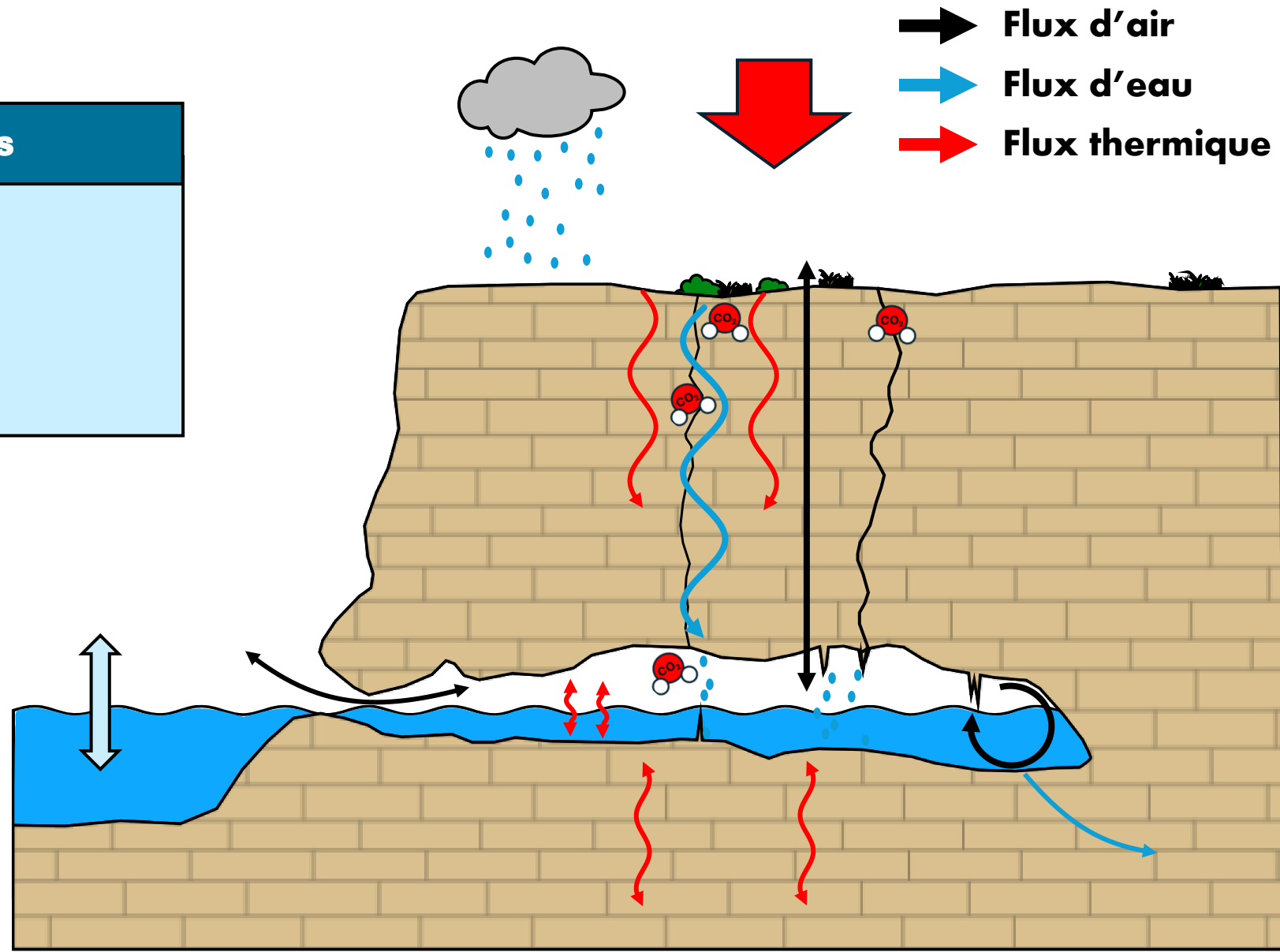
Problème du changement climatique rapide ?

Contexte



Cas des karst côtiers

- Niveau marin
- Eau saumâtre
- Échanges thermiques



Cas d'étude : grotte Cosquer



Cas
d'étude

Photo : C. Montoya



Photo : S. Touron



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

Cas d'étude : grotte Cosquer



Photo : C. Montoya

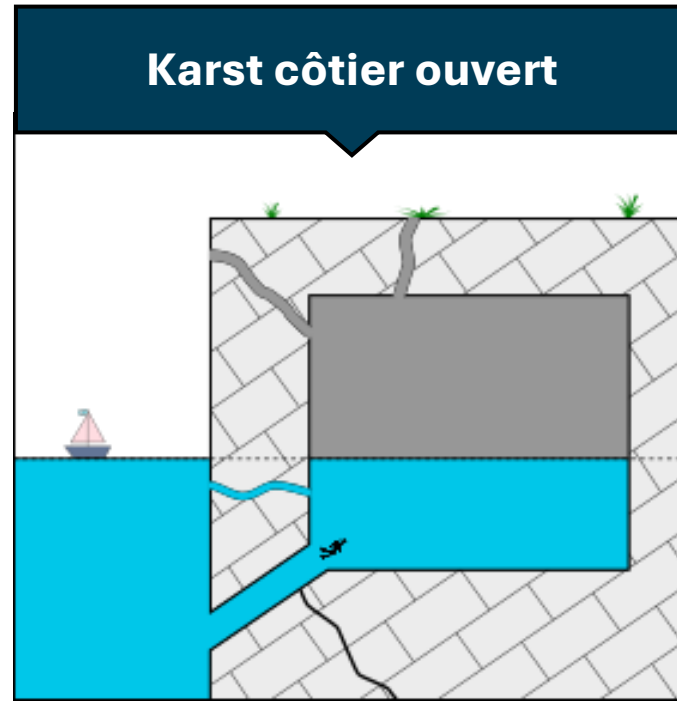
- Problèmes similaires aux autres grottes
- Connectée à la mer : variations du niveau marin

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

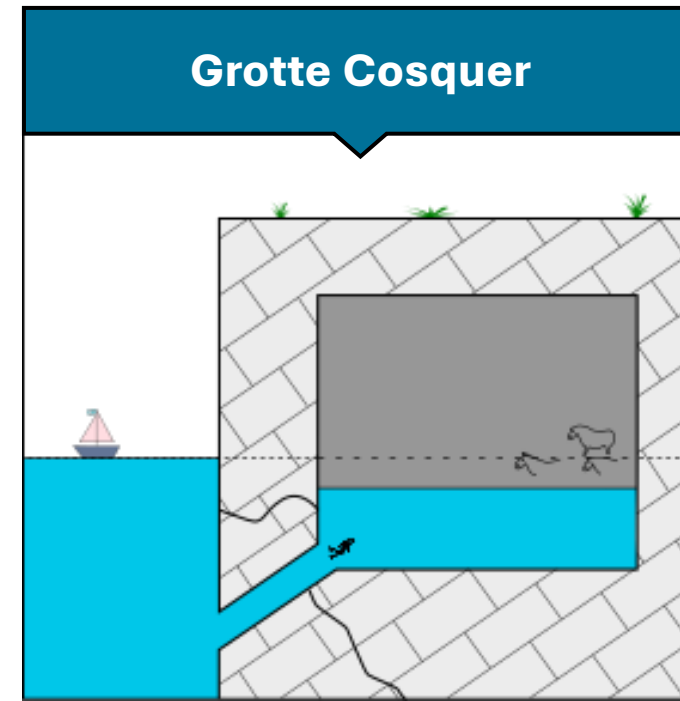
→ Quel avenir pour ce type de grotte avec le changement climatique ?

Cas d'étude : grotte Cosquer

Cas
d'étude



Niveau d'eau = Niveau mer



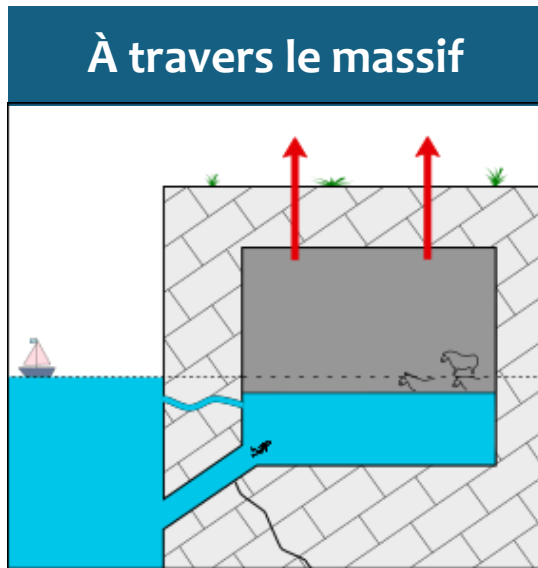
Niveau d'eau < Niveau mer

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

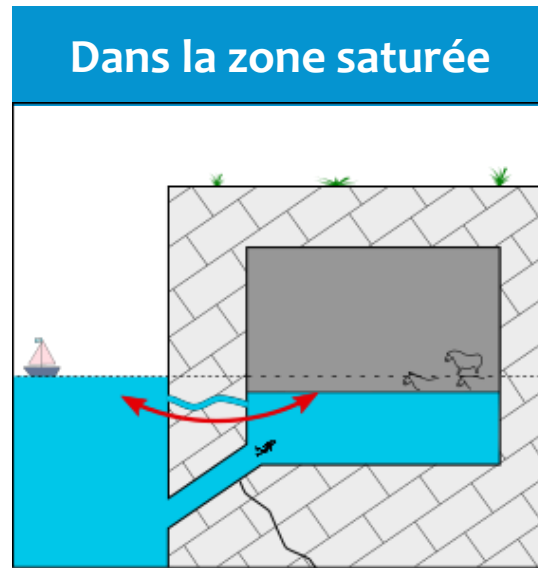
Objectifs : modéliser les écoulements d'air et d'eau dans un hydrosystème karstique côtier

Cas
d'étude

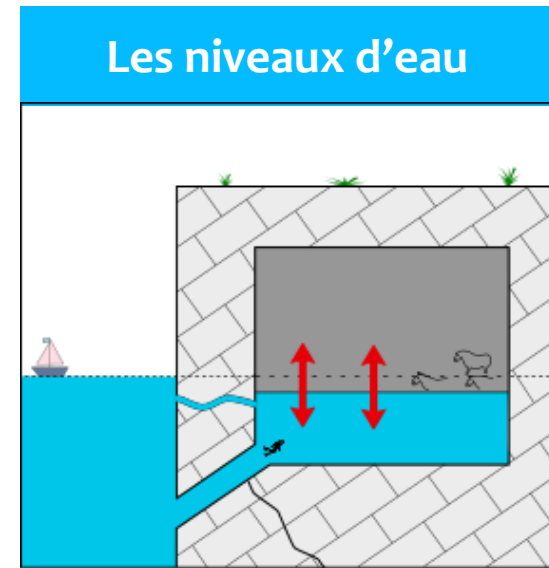
→ 3 axes de travail



Pellet *et al.* 2024, HESS



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



Cas d'étude : grotte Cosquer

Cas
d'étude



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

Parc National des Calanques

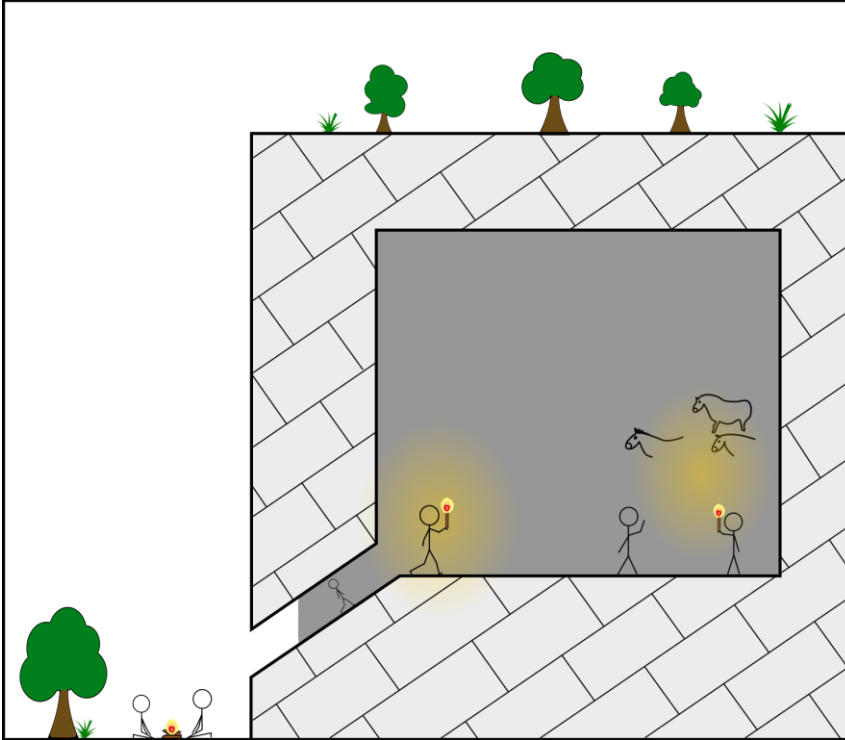


Photo : Olive et Vanrell



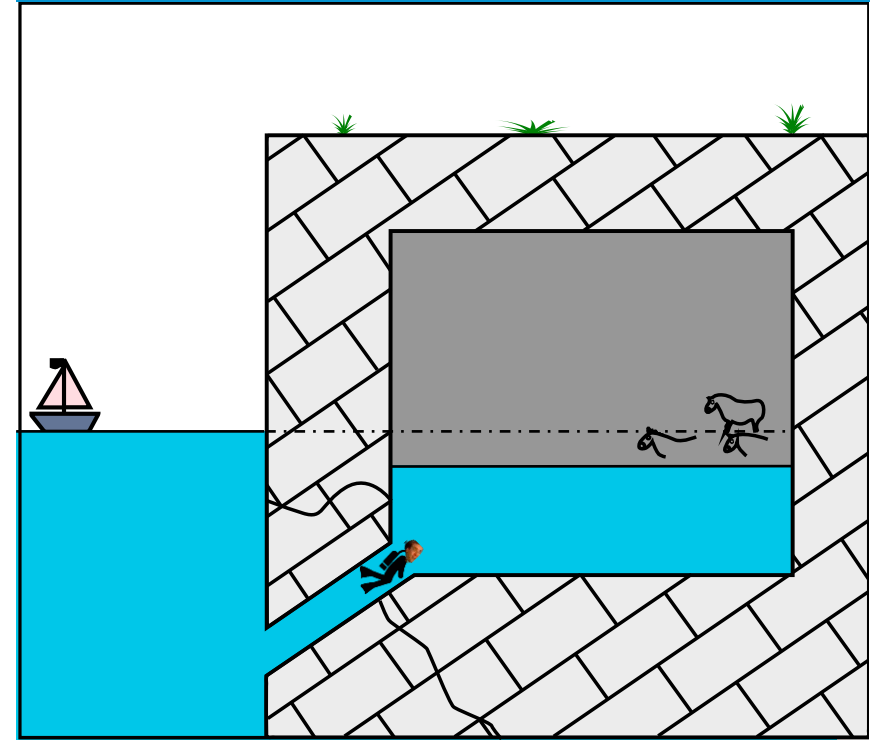
Cas
d'étude

32500 à 19000 ans cal. BP



- Dernière ère glaciaire
- Niveau marin 120 m plus bas

Aujourd'hui



- 1/2 de la hauteur de la grotte noyée



Cas
d'étude

Thèmes classiques de l'art paléolithique

Mégacéros



Photo : C. Montoya

Chamois



Photo : C. Montoya

Chevaux



Photo : S. Touron



Thèmes rares dans l'art paléolithique

Phoques



Photo : L. Vanrell

Pingouins



Photo : S. Touron

Méduses



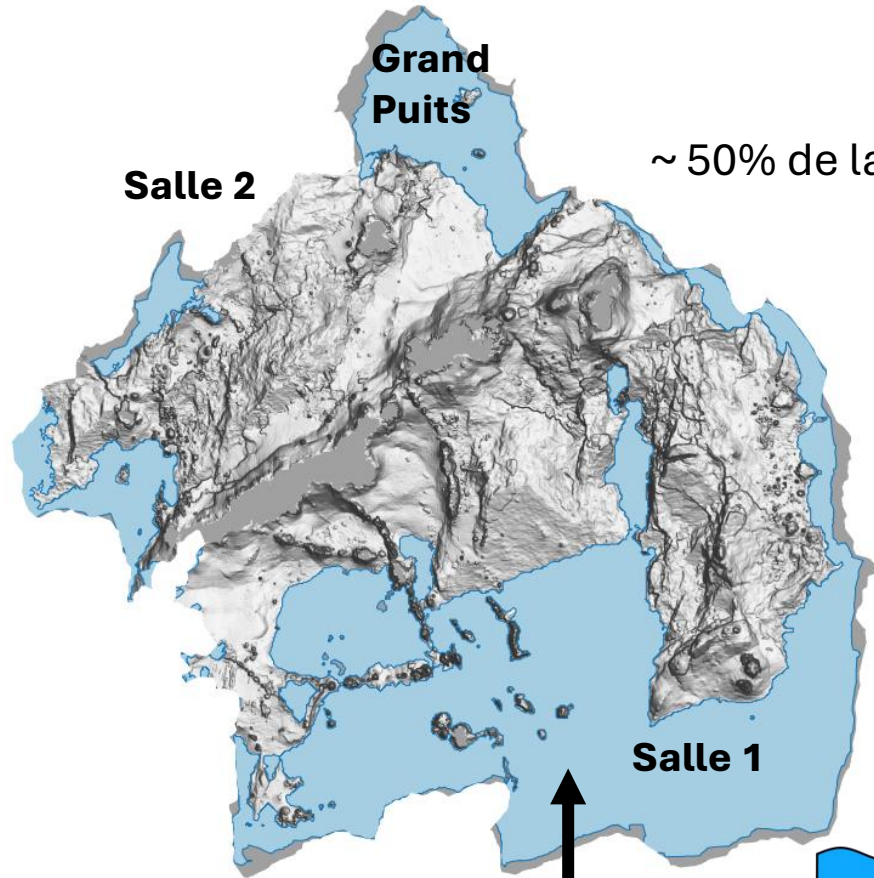
Photo : S. Touron

Cas d'étude : grotte Cosquer



Cas
d'étude

Vue du dessus



~ 50% de la surface recouverte d'eau

0 10 20 m

Crédit : C. Font

Entrée



Conduit supérieur Grand Puits

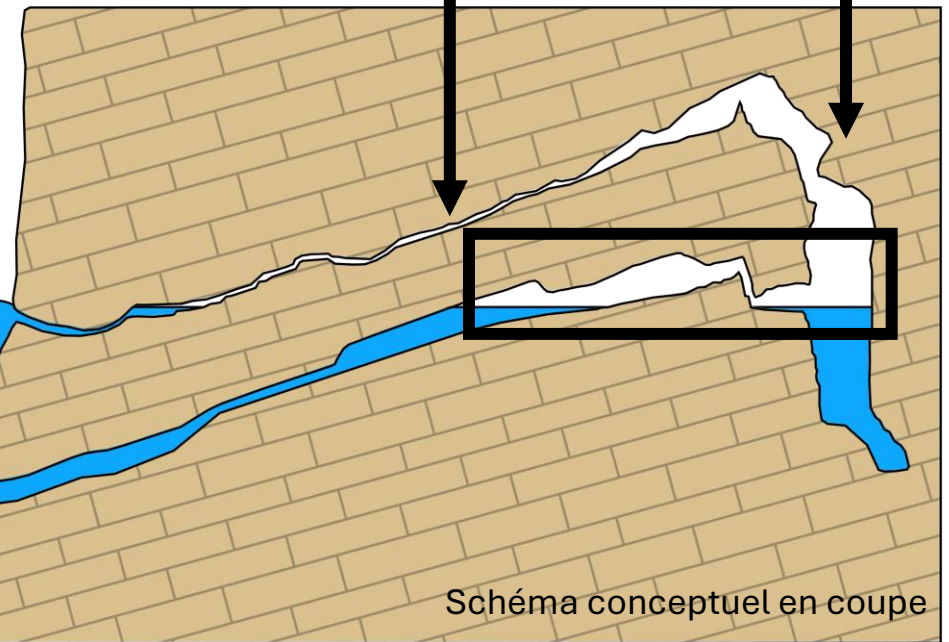


Schéma conceptuel en coupe



Photo : B. Arfib

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

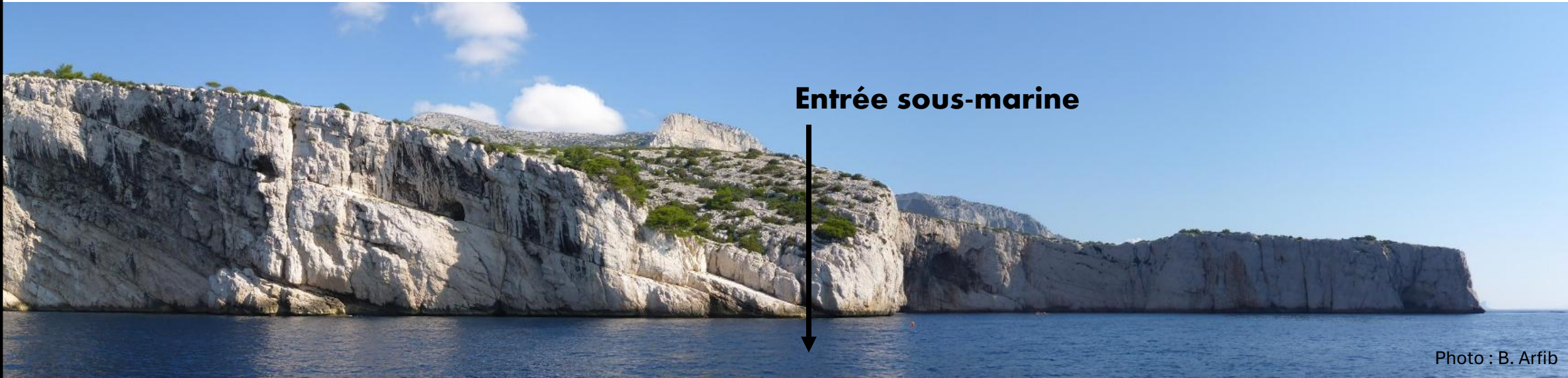
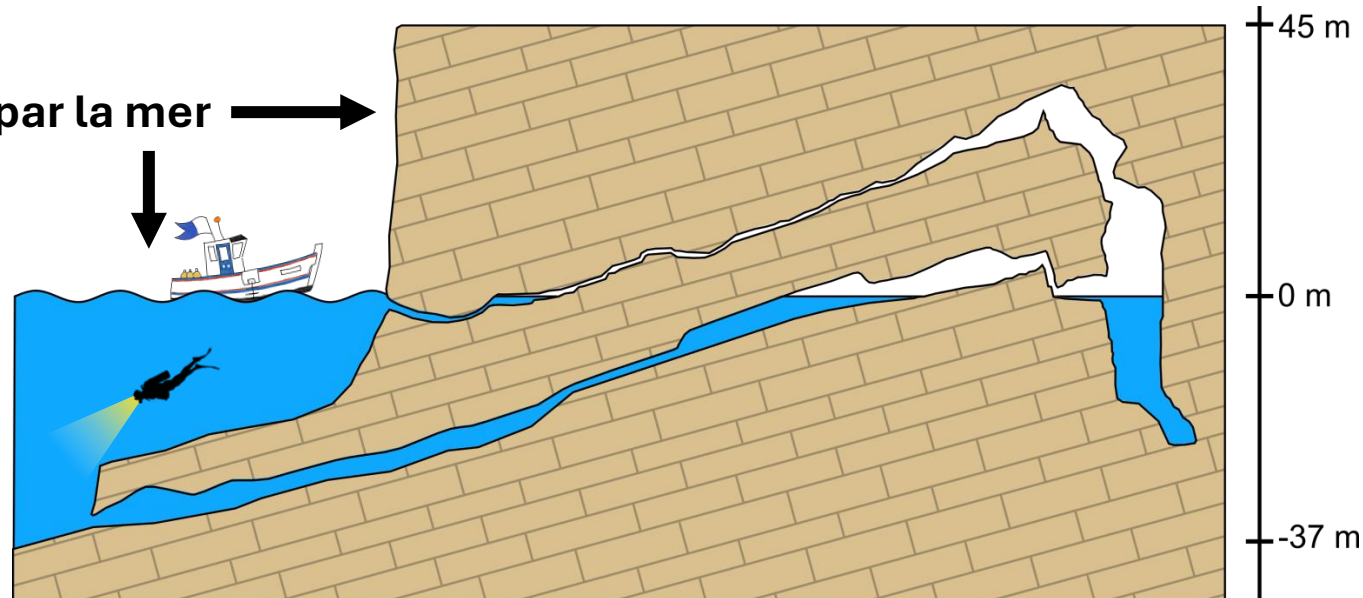


Photo : B. Arfib

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



Données du suivi hydroclimatique

Depuis 2014 (10 ans de données)

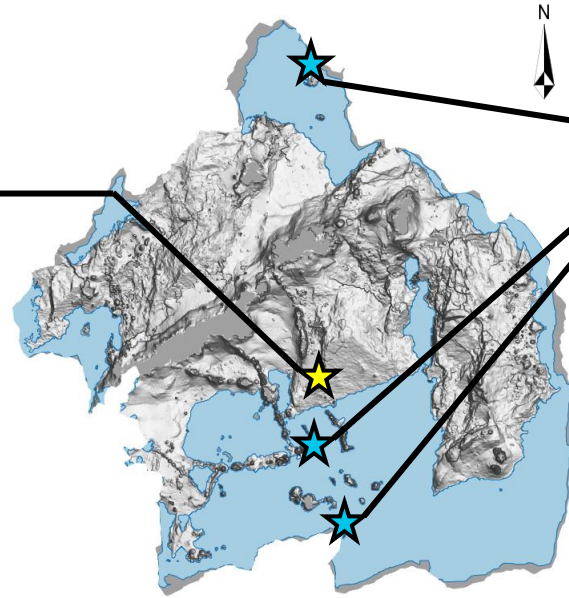
Fréquence d'acquisition : 5 min

Dans l'air

- Pression
- Température



Photo : B. Arfib



Dans l'eau

- Pression
- Température
- Conductivité électrique



Photo : L. Vanrell

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**

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

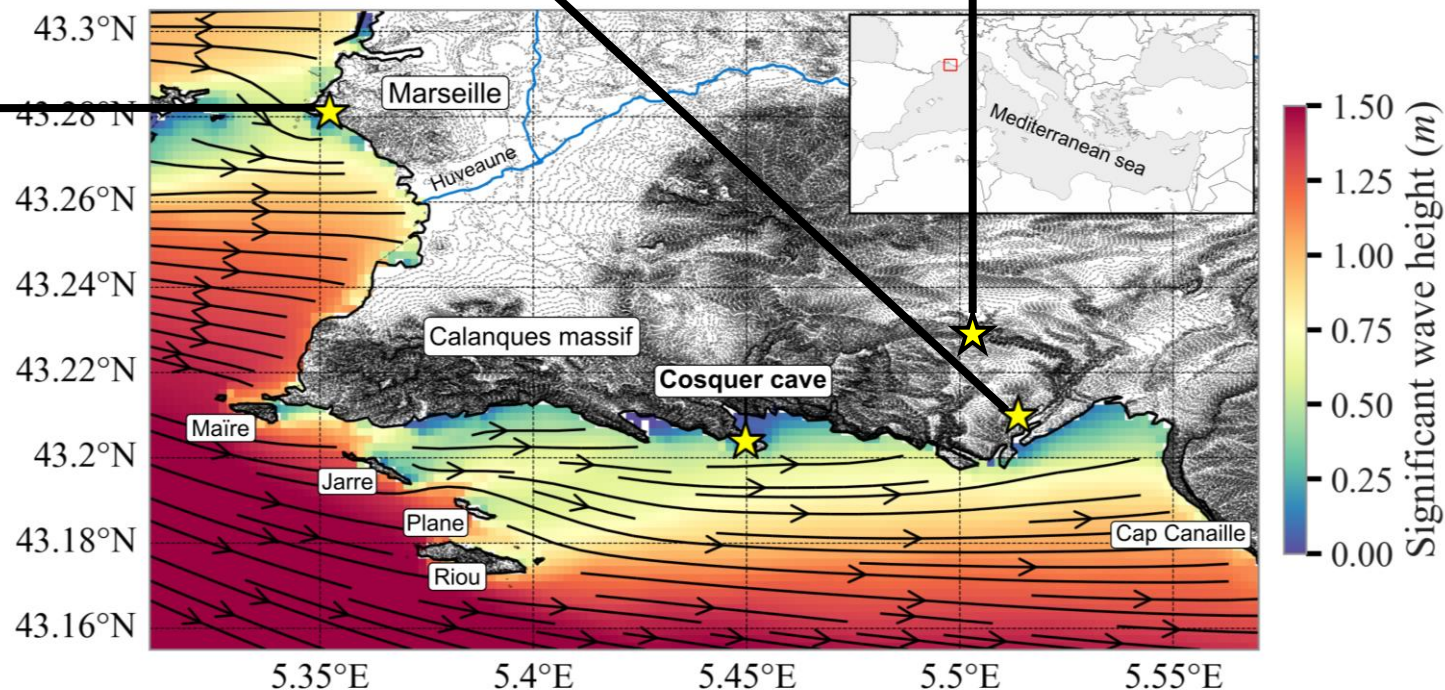
Fréquence : variable

Simulation numérique du SHOM

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

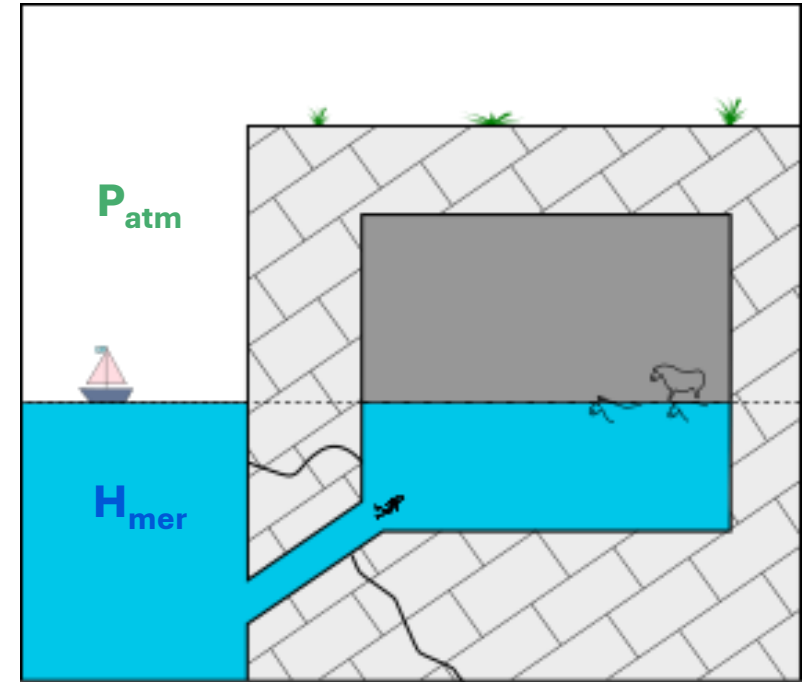
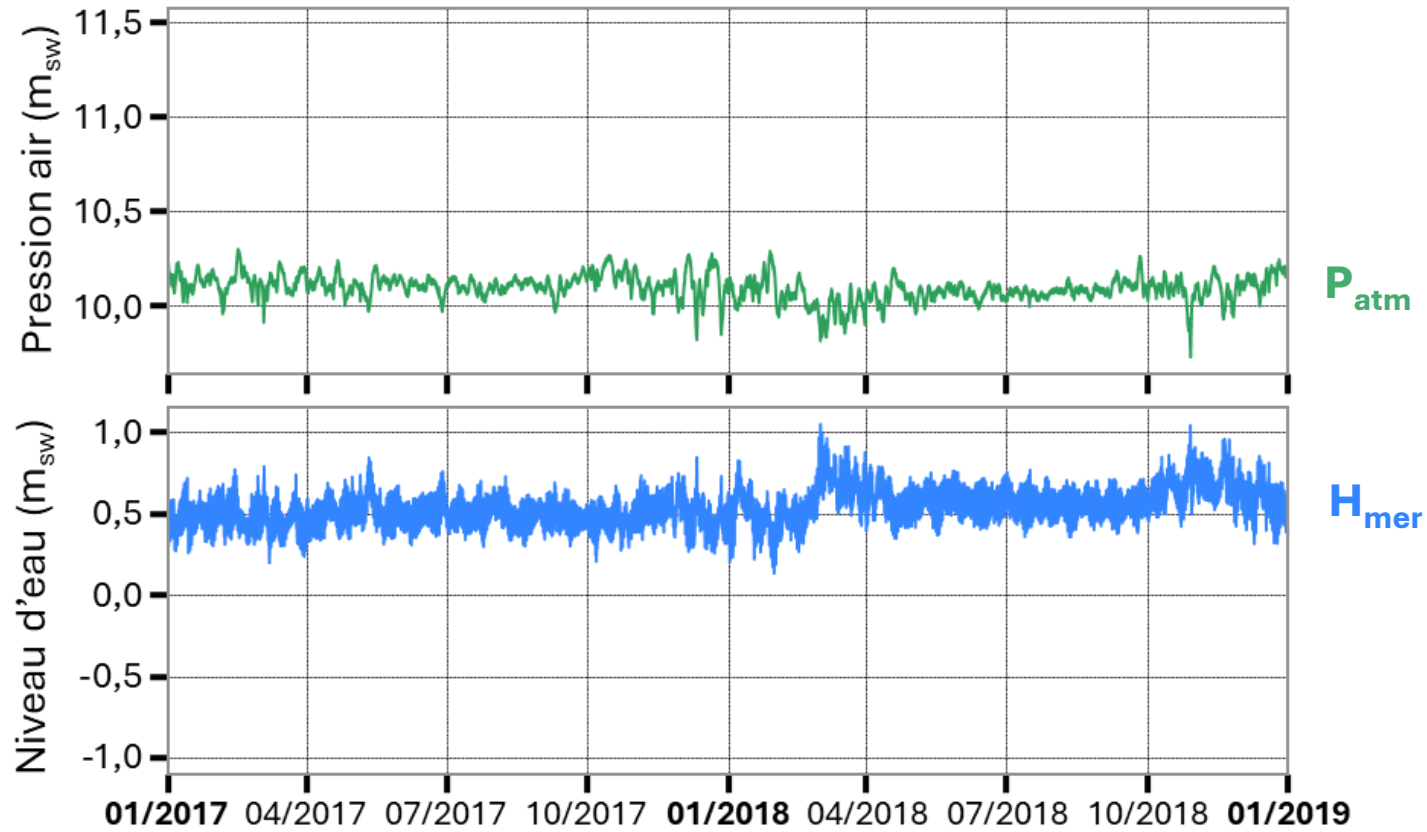
De 2015 à 2023

Fréquence : 3h



Fonctionnement hydroclimatique

Données de 2014 à 2024

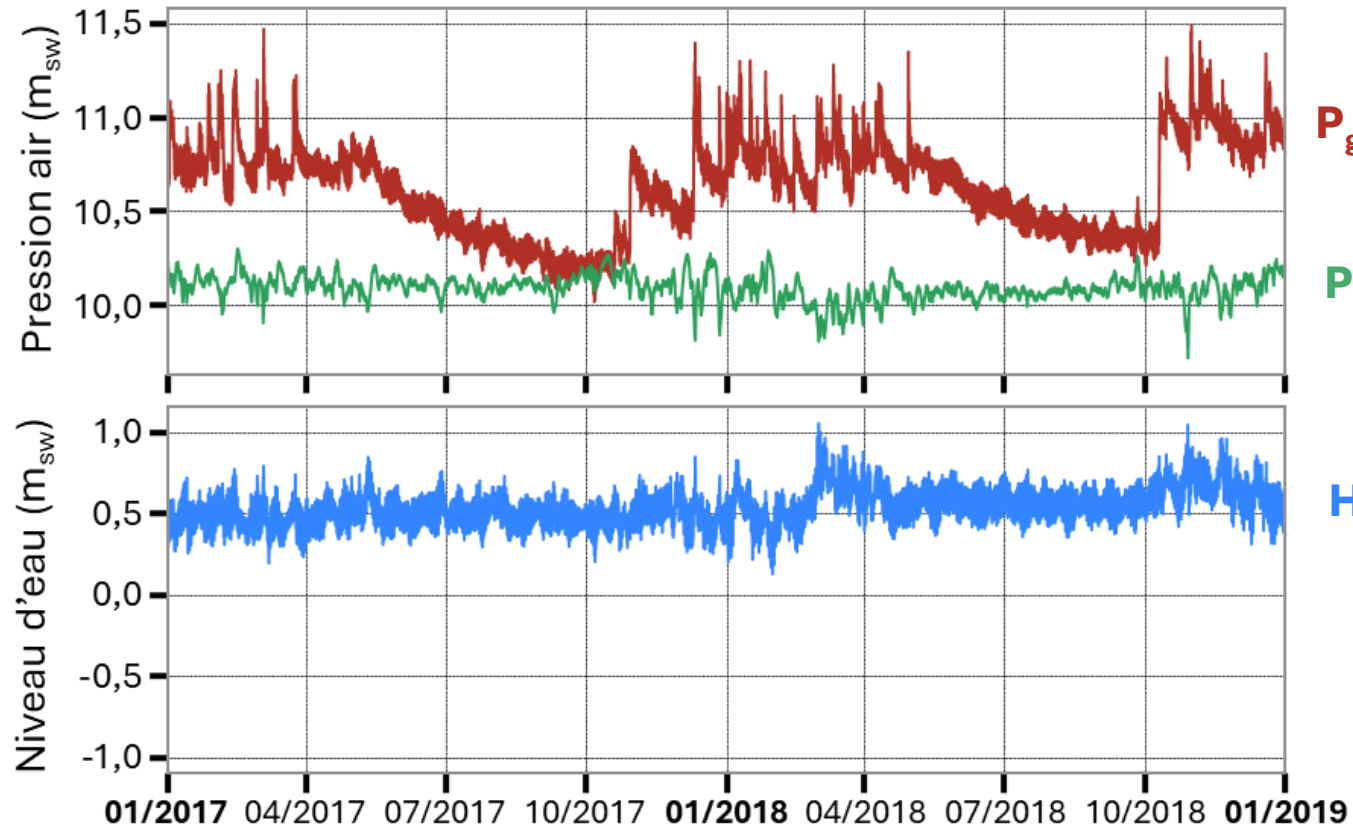
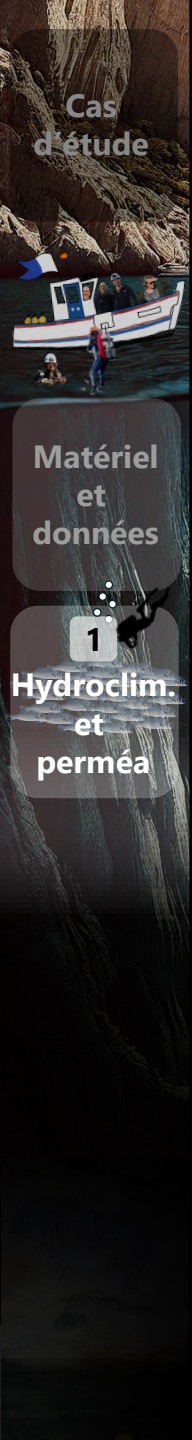


Cas d'étude

Matériel et données

1 Hydroclim. et perméa

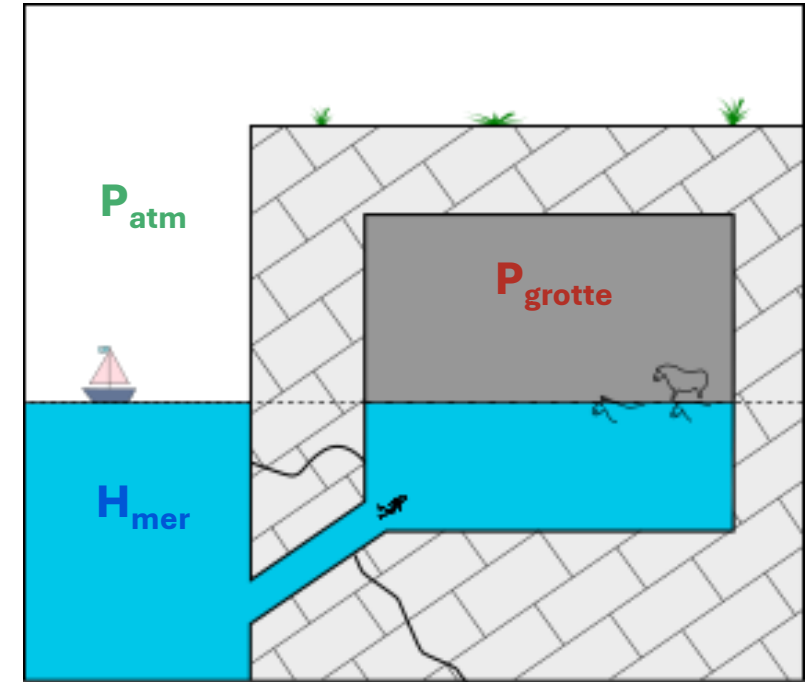
Fonctionnement hydroclimatique



P_{grotte}

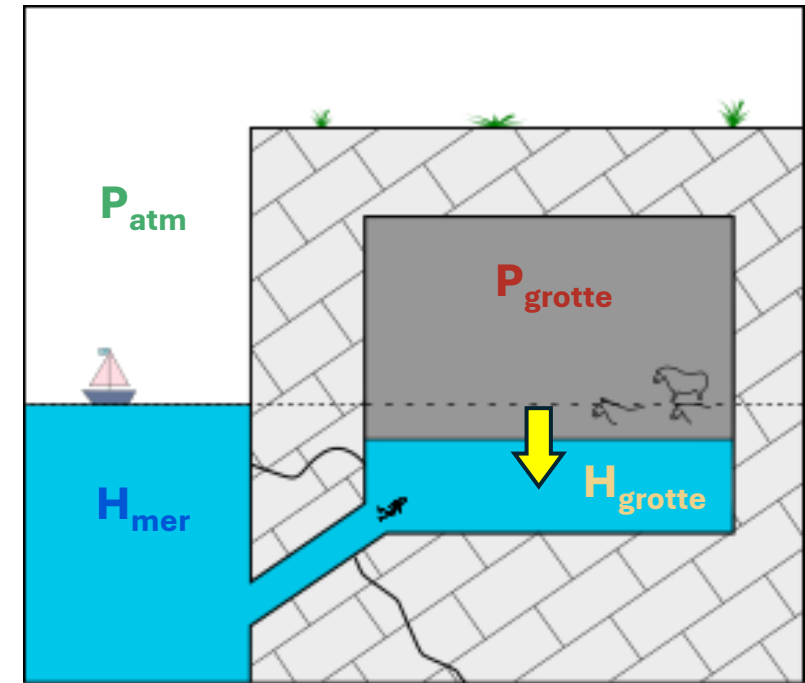
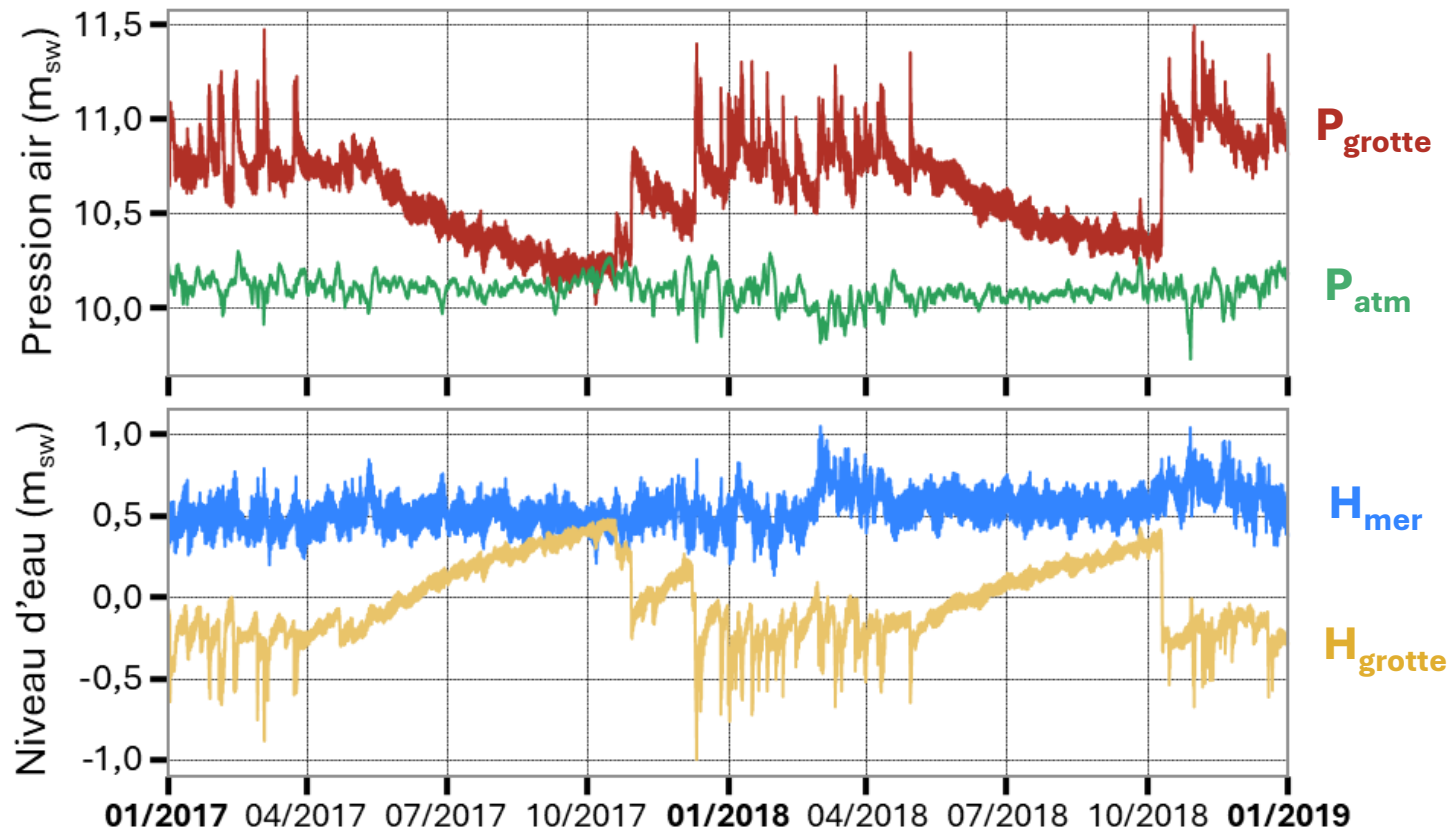
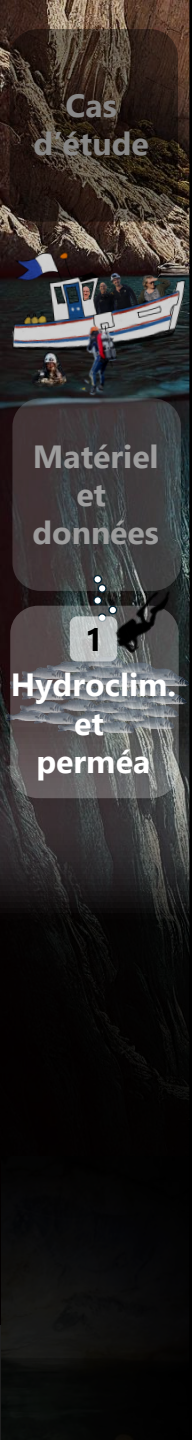
P_{atm}

H_{mer}



$$P_{grotte} > P_{atm}$$

Fonctionnement hydroclimatique



$$P_{grotte} > P_{atm}$$

$$H_{grotte} < H_{mer}$$

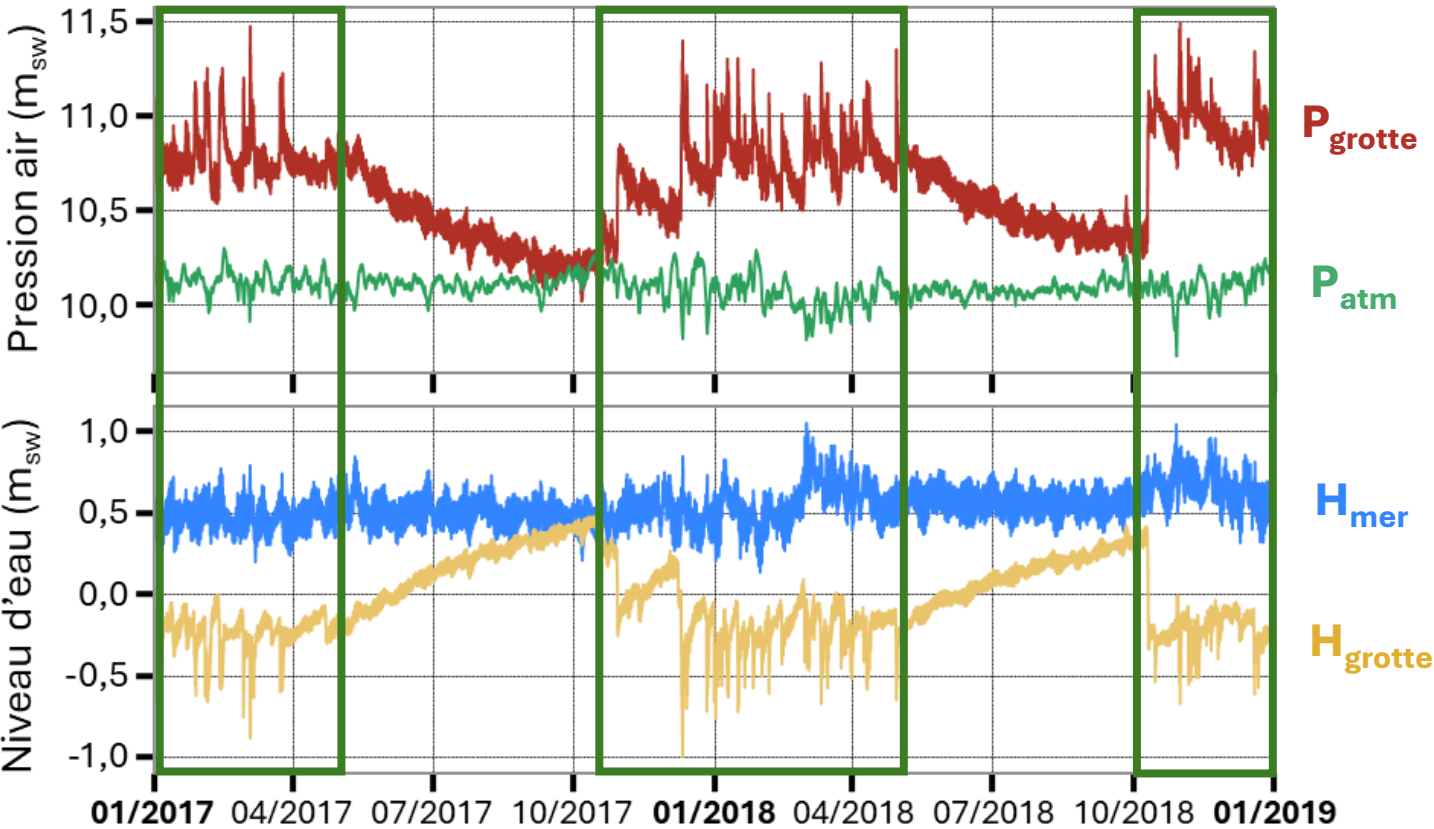
Fonctionnement hydroclimatique : saisonnalités

Cas d'étude

Matériel et données

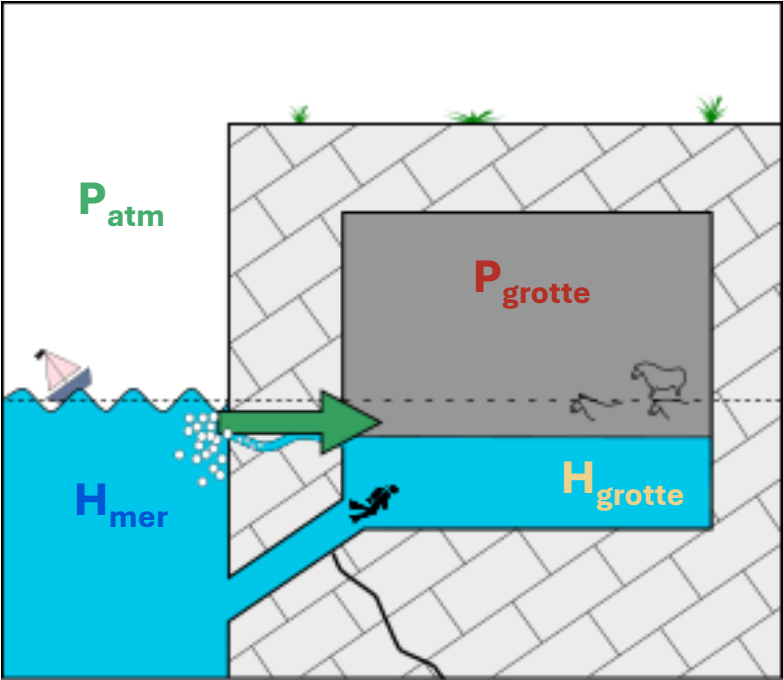
1 Hydroclim. et perméa

Automne et hiver



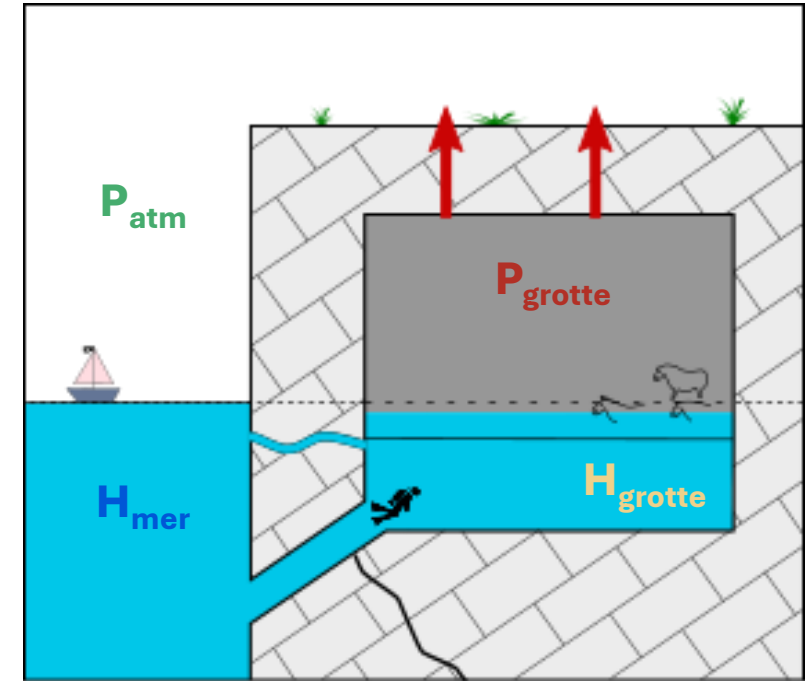
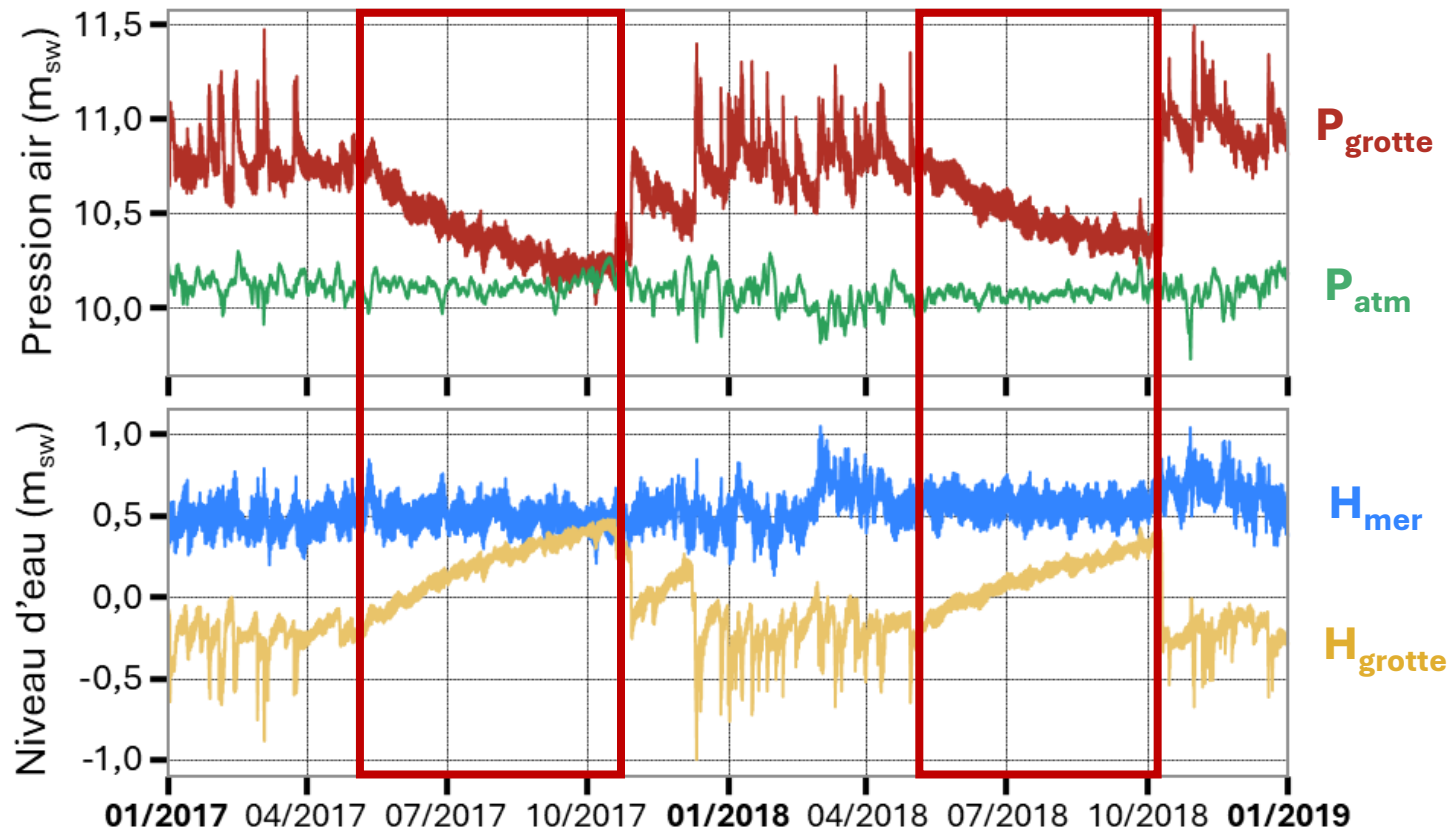
Rapides mises en pression

Succession d'évènements de mise en pression



Fonctionnement hydroclimatique : saisonnalités

Printemps et été



Cas d'étude

Matériel et données

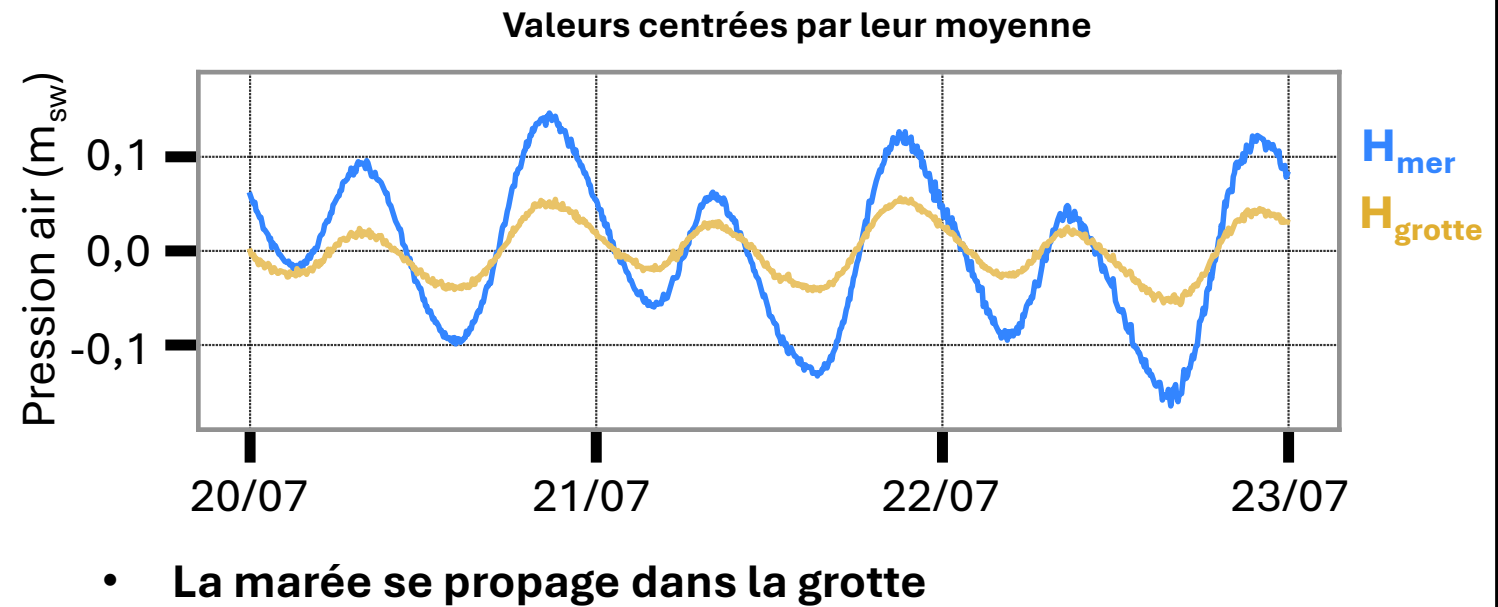
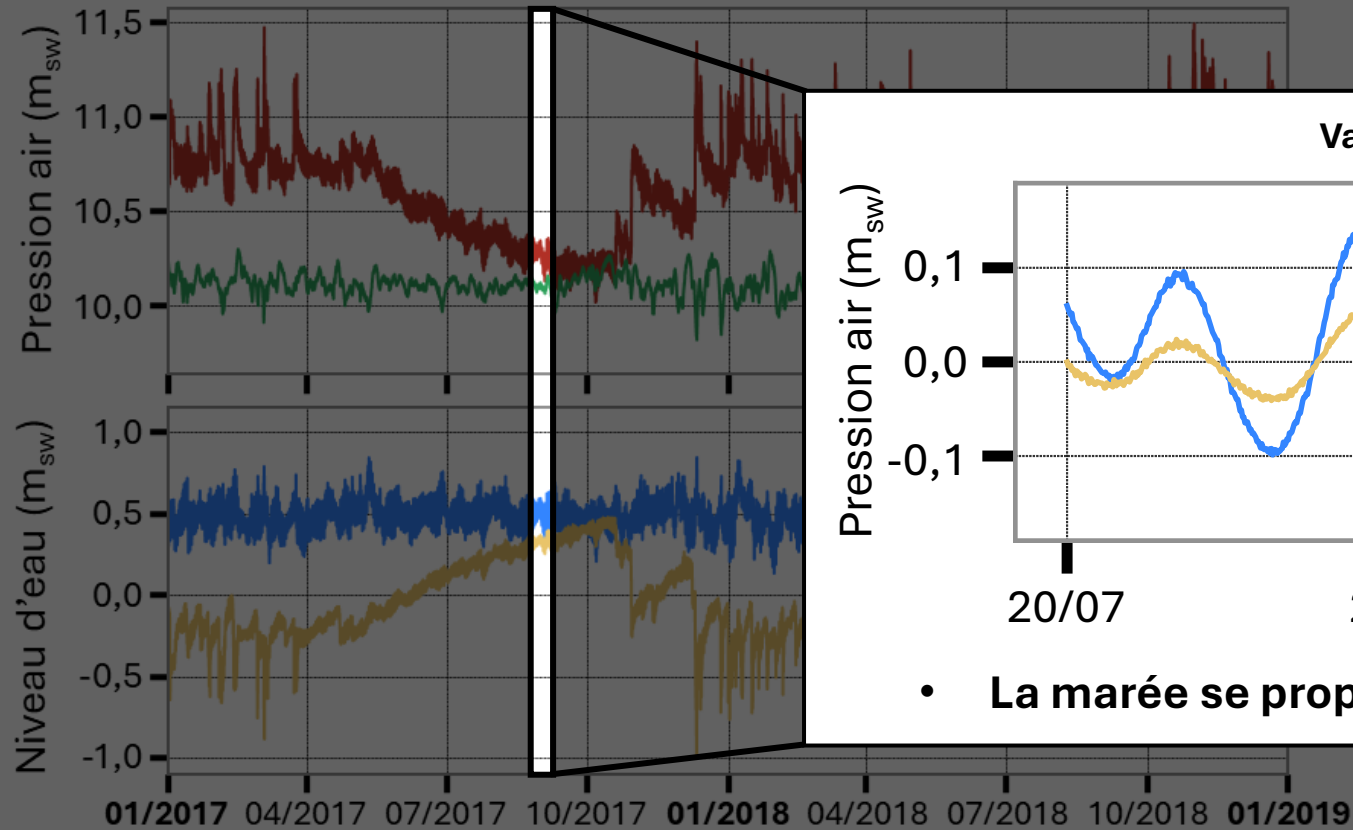
1 Hydroclim. et perméa

Fonctionnement hydroclimatique : variation avec les marées

Cas
d'étude

Matériel
et
données

1
Hydroclim.
et
perméa

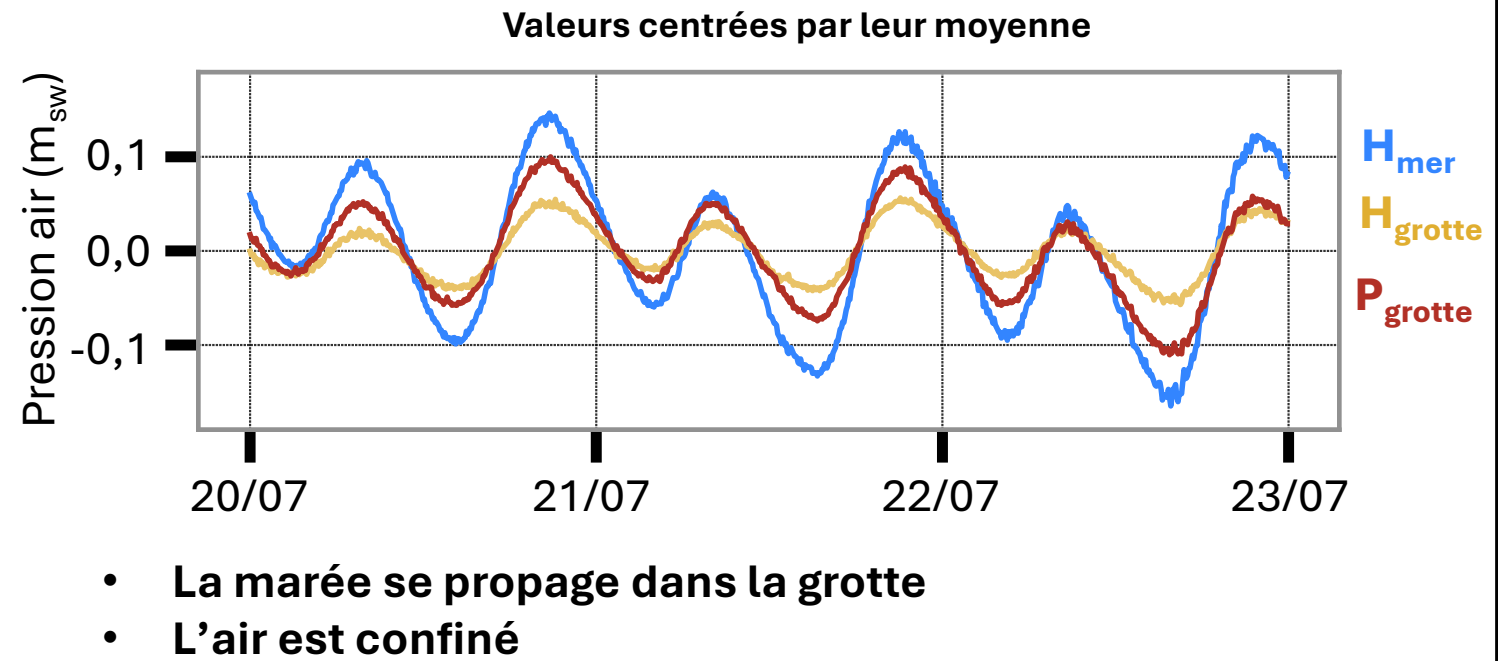
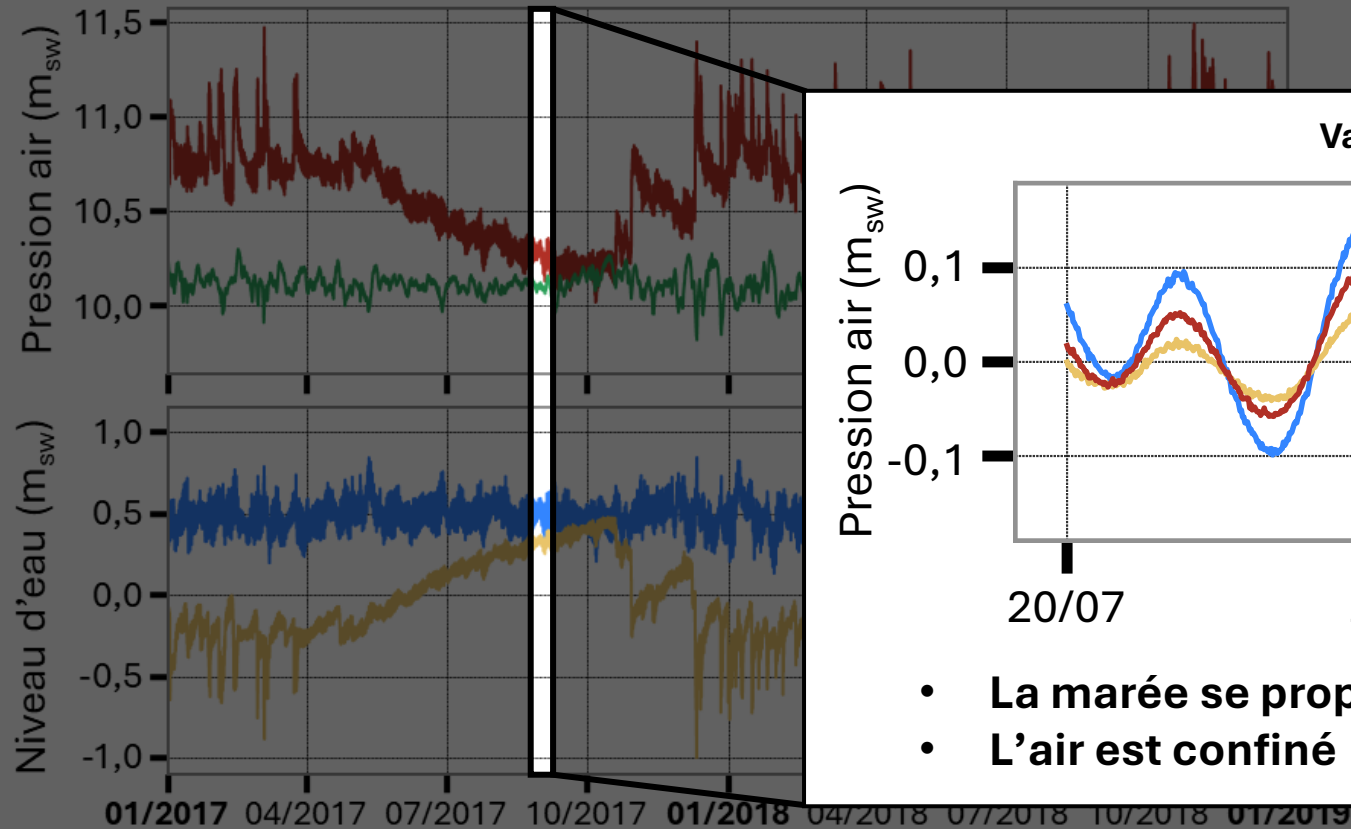


Fonctionnement hydroclimatique : variation avec les marées

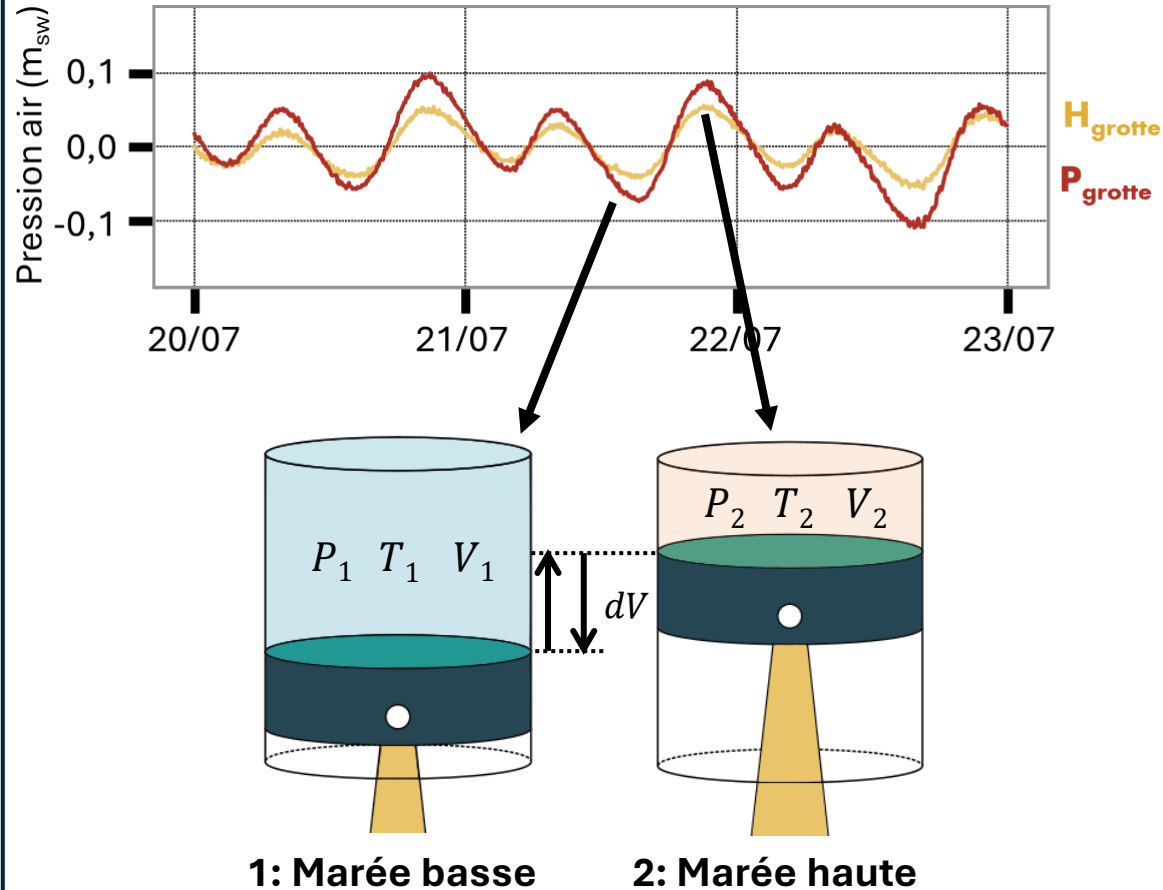
Cas
d'étude

Matériel
et
données

1.
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

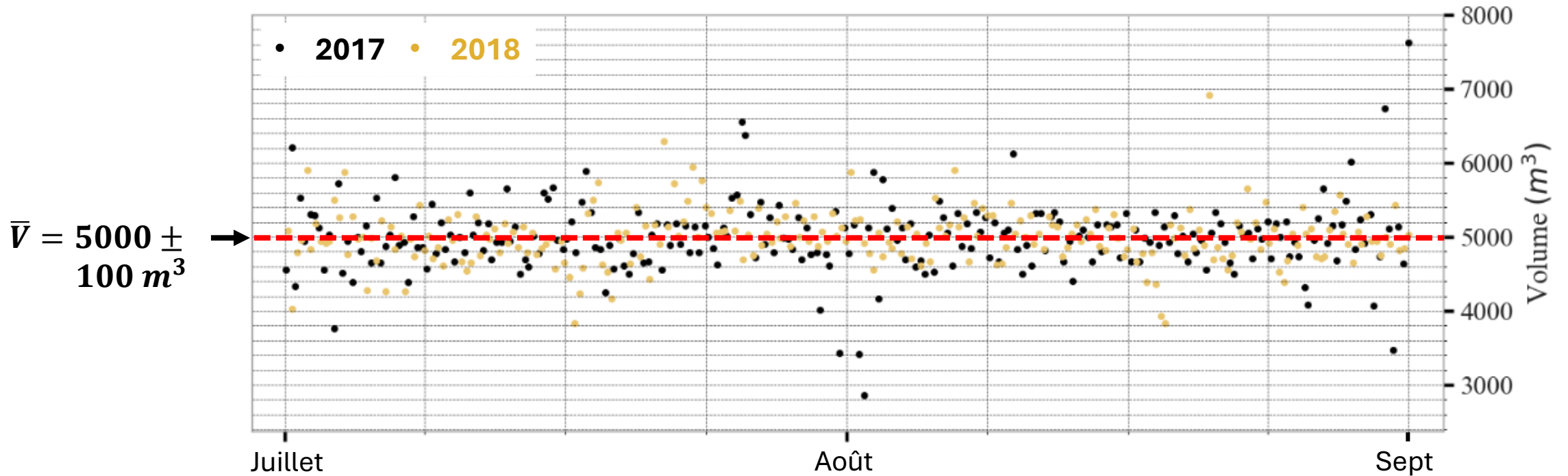
$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$V_1 = V_2 + dV$$

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

Calcul du volume

240 mesures de volume entre Juillet et Août par année



Calcul du débit

Volume

Quantité d'air

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

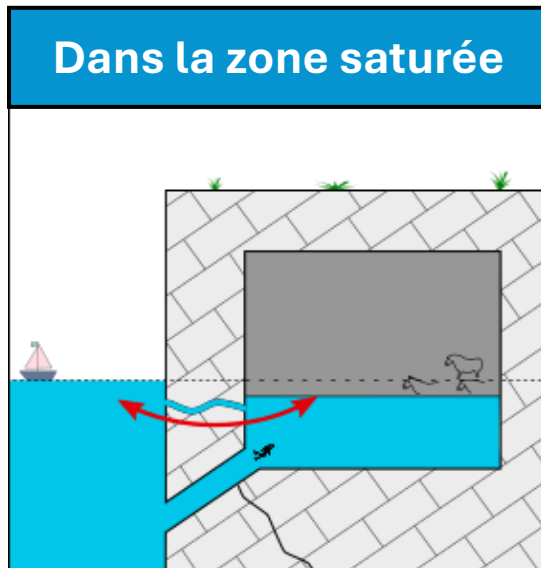
Débit d'air

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

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

Débit d'air entrant $\approx 91 - 220 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Débit d'air sortant $\approx -20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

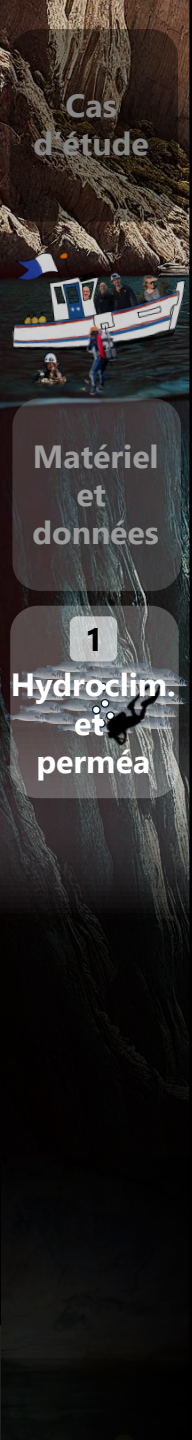
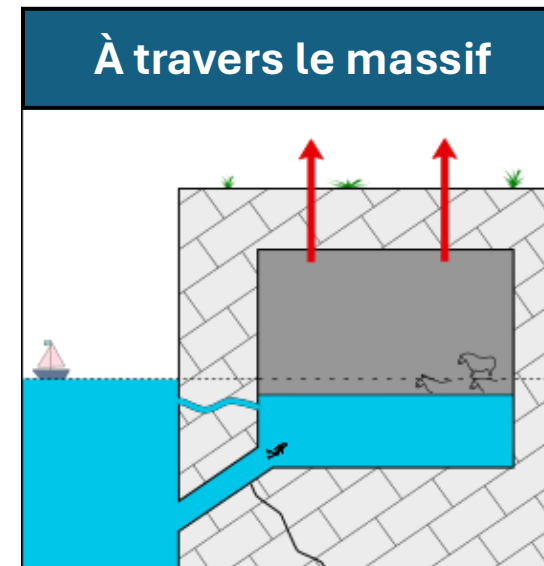
Larges conduits dans la zone saturée



Lente baisse de la pression estivale

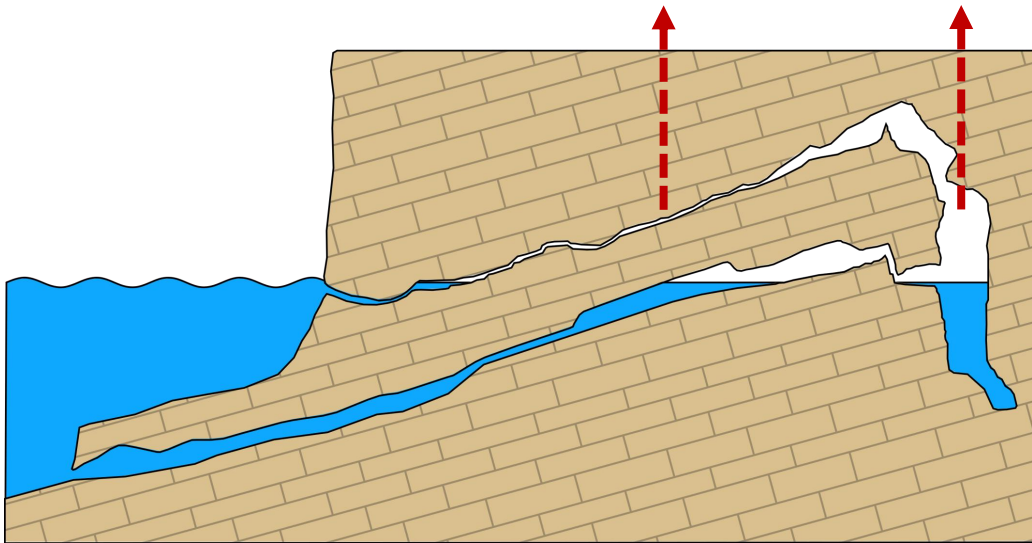
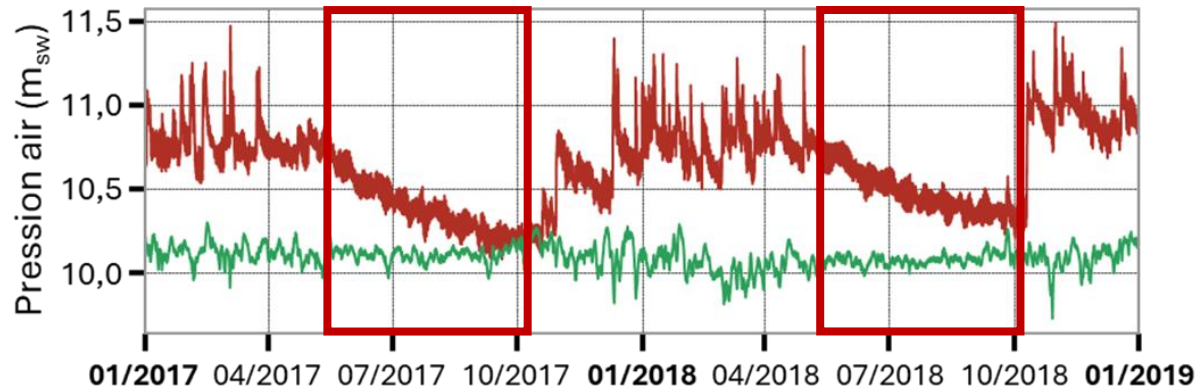
Débit d'air sortant $\approx -0.24 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
→ Facteur 100 à 1000

Perméabilité dans la zone vadose



Calcul de la perméabilité

Lente baisse de la pression = fuite à travers le massif



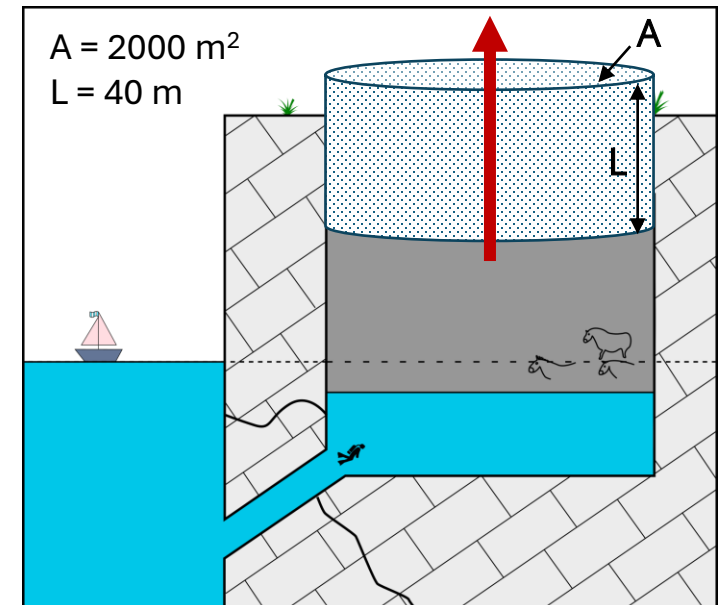
Loi de Darcy

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

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

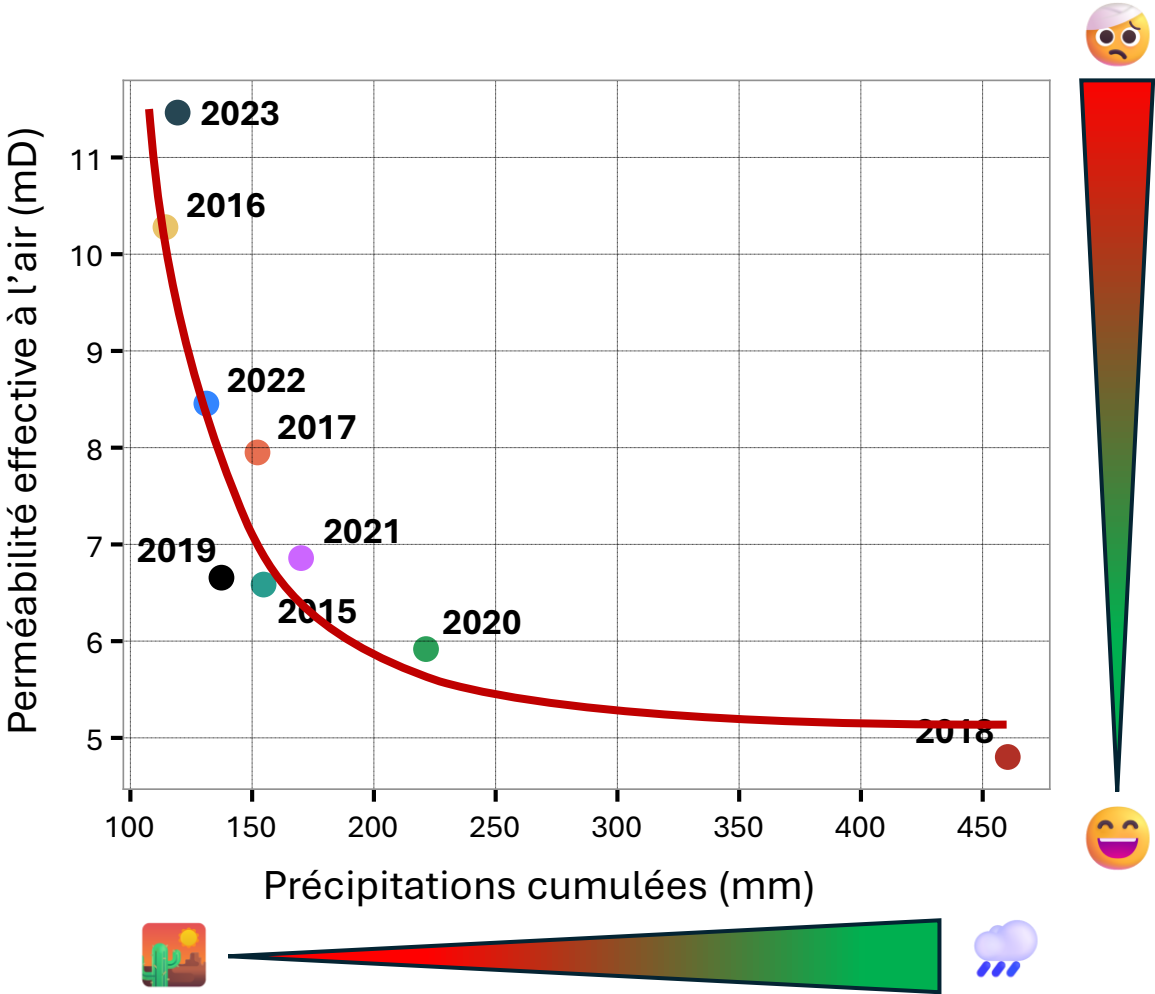
→ 1 valeur par an : moyenne de juillet et août

Milieu poreux

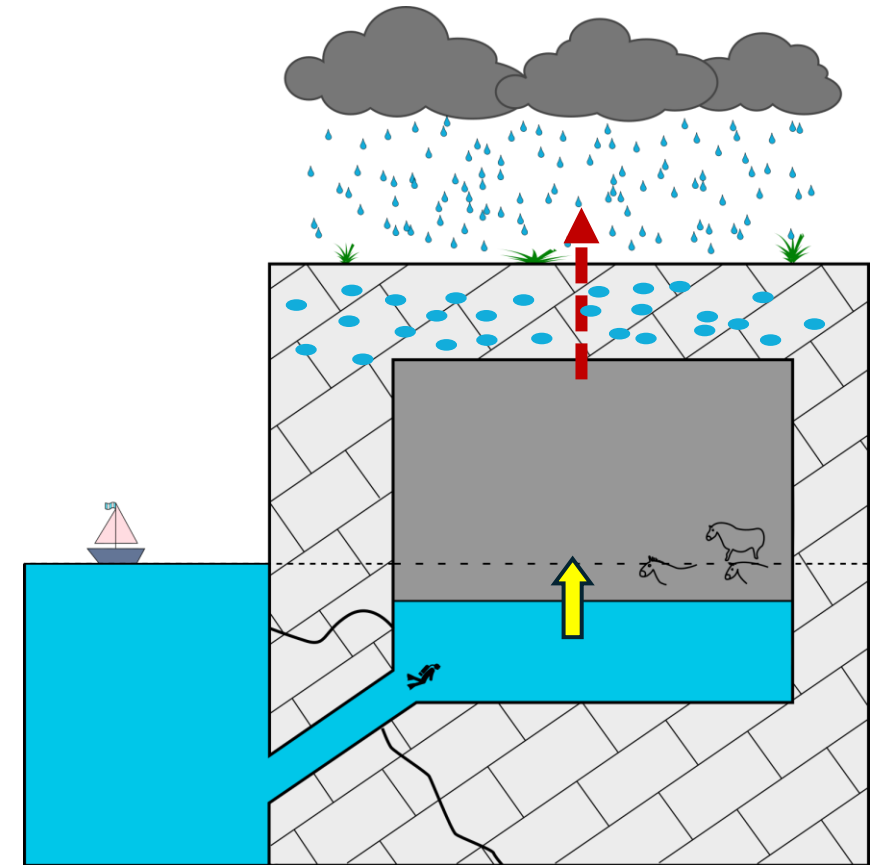
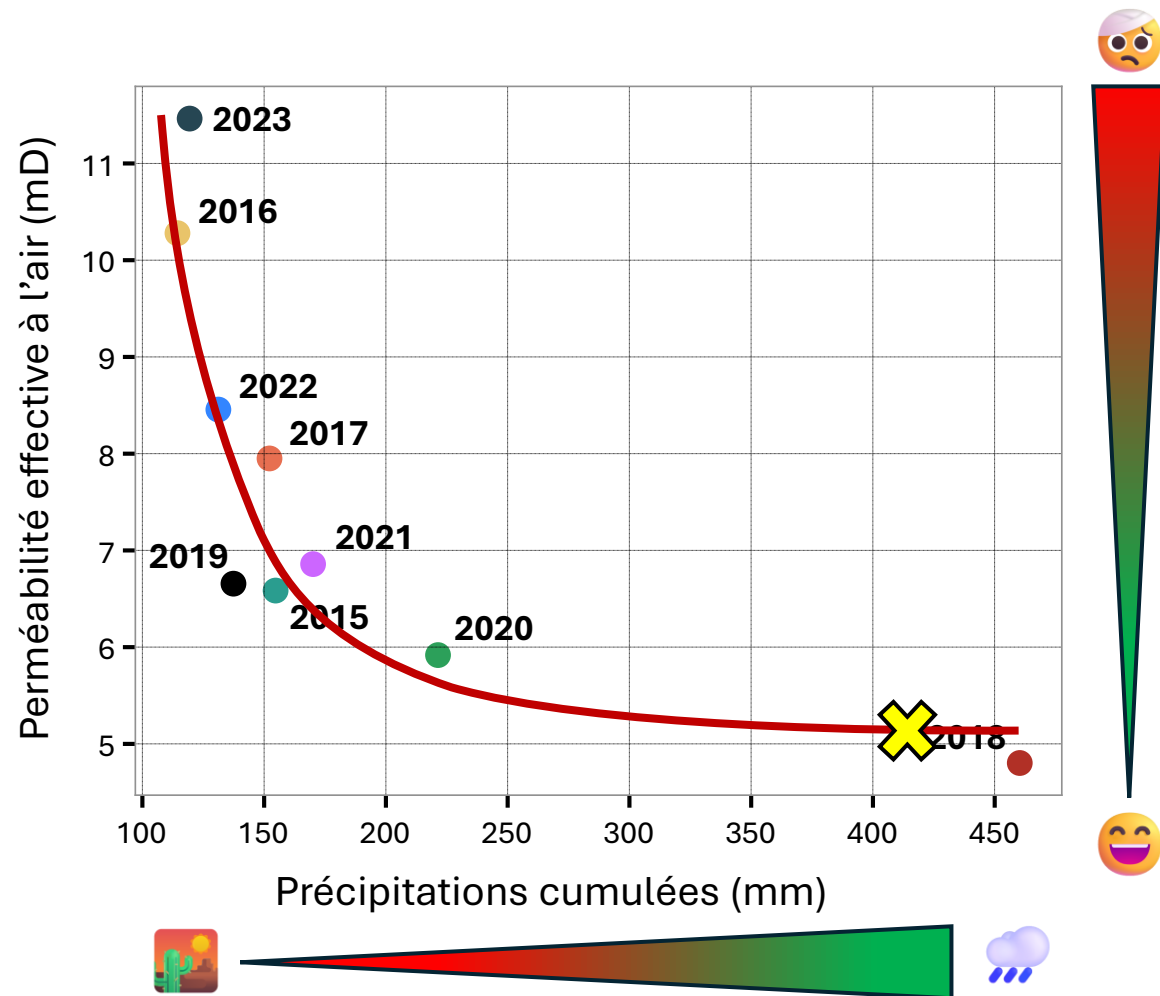


$k_a = 4,6 \text{ à } 11,5 \text{ mD}$ (2015 à 2023)

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

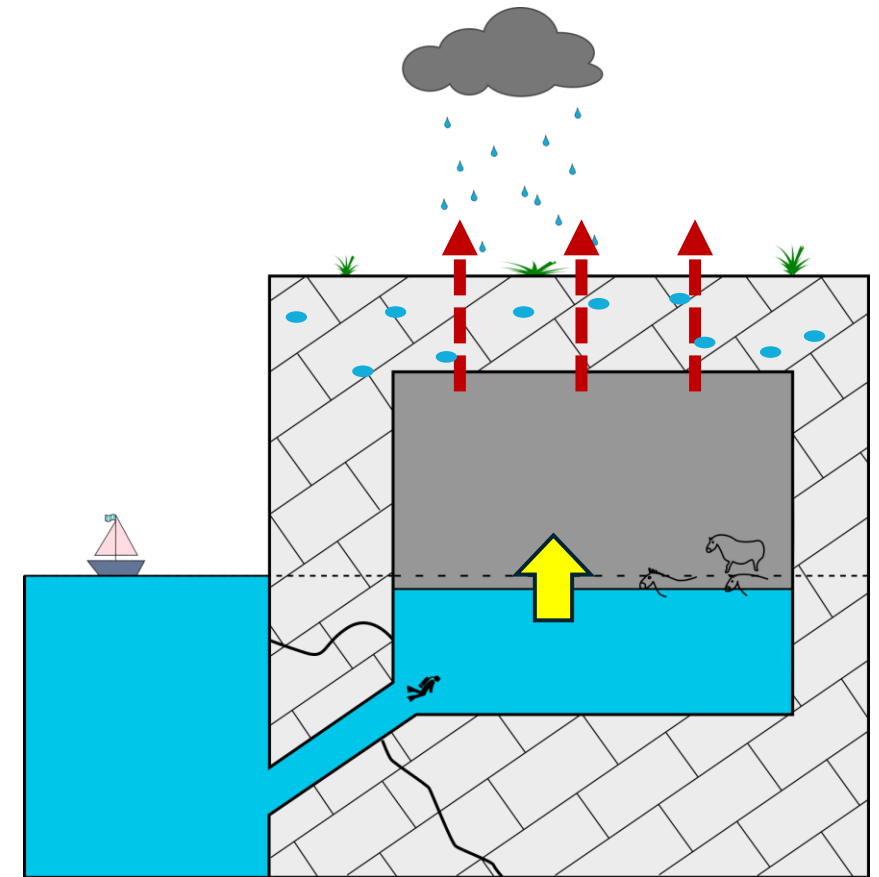
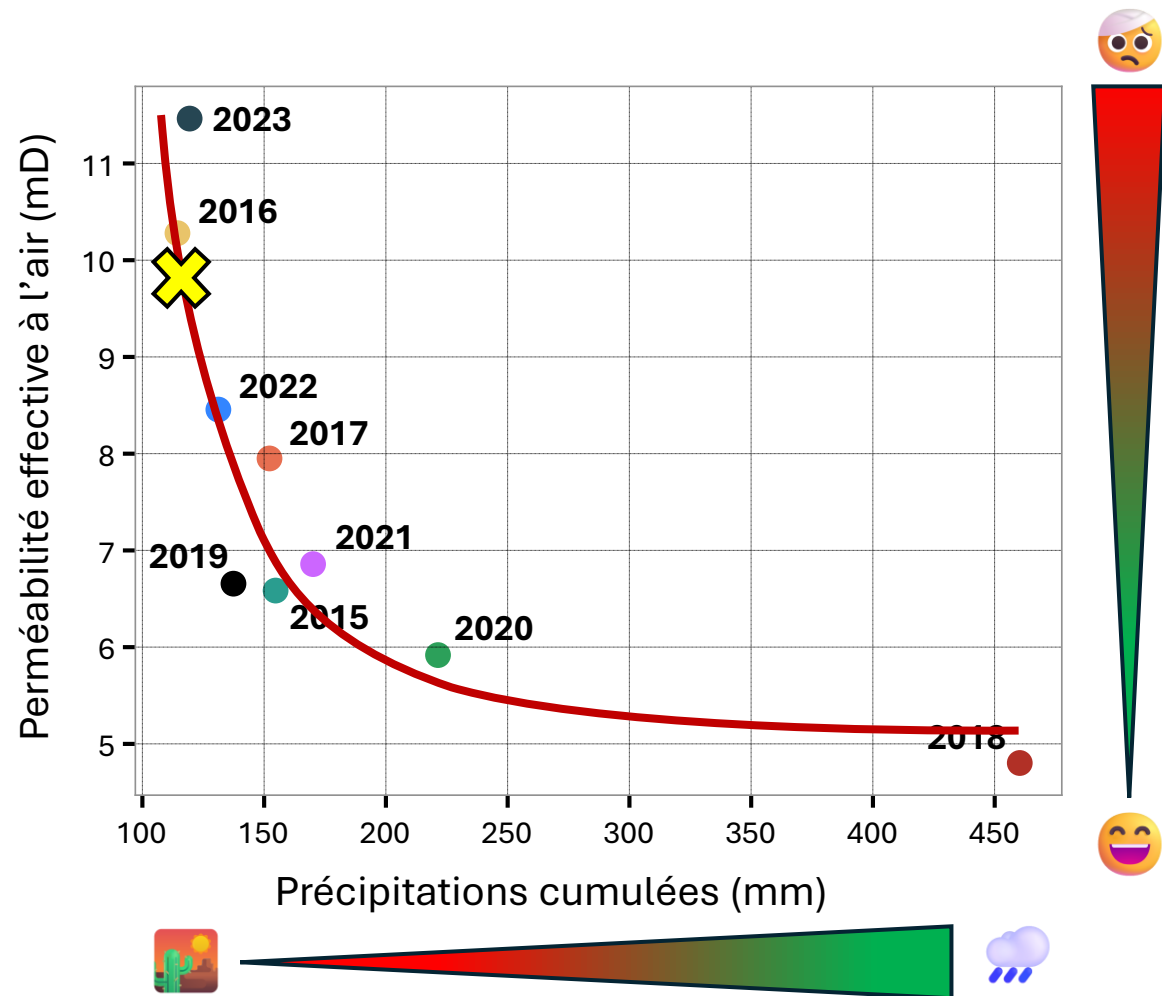


Comparaison de la perméabilité avec les précipitations cumulées de mars à août (2015 à 2023)



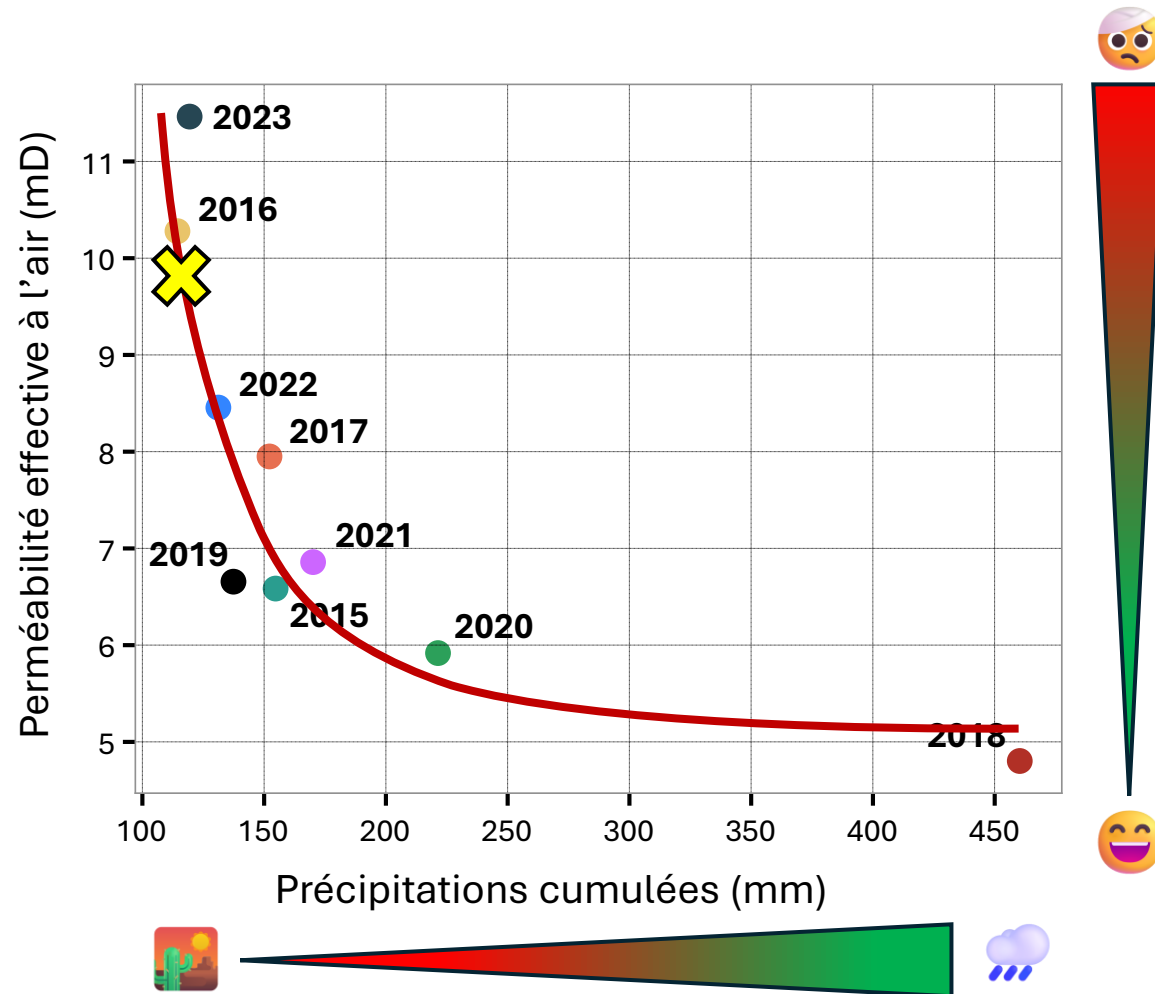
Année pluvieuse

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



Année sèche

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

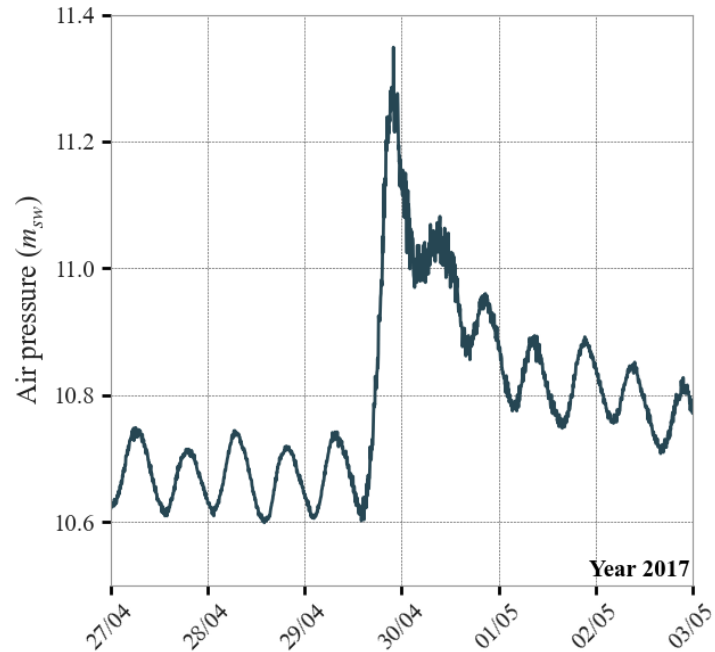


Changement climatique

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

→ Valables pour les grottes peu profondes

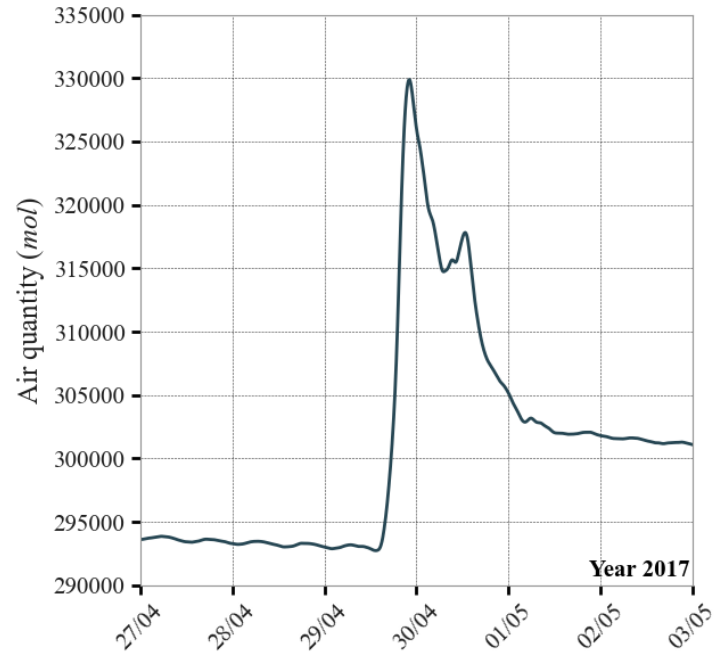
1^{re} étape : définir les évènements de mise en pression



La pression de l'air varie :

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

1^{re} 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**

Cas
d'étude

Matériel
et
données

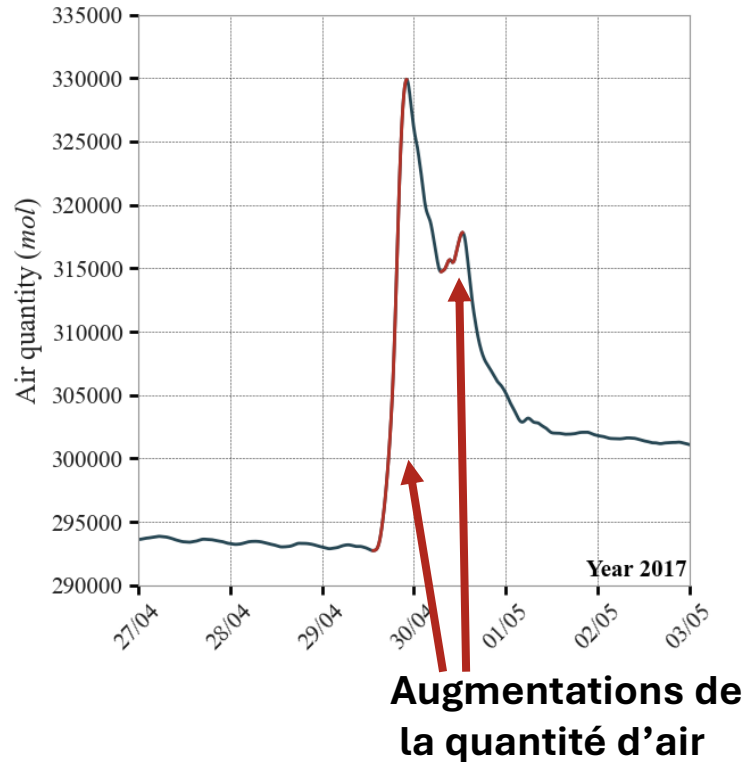
1

Hydroclim.
et
perméa

2

Hydroclim.
vs
Océano.

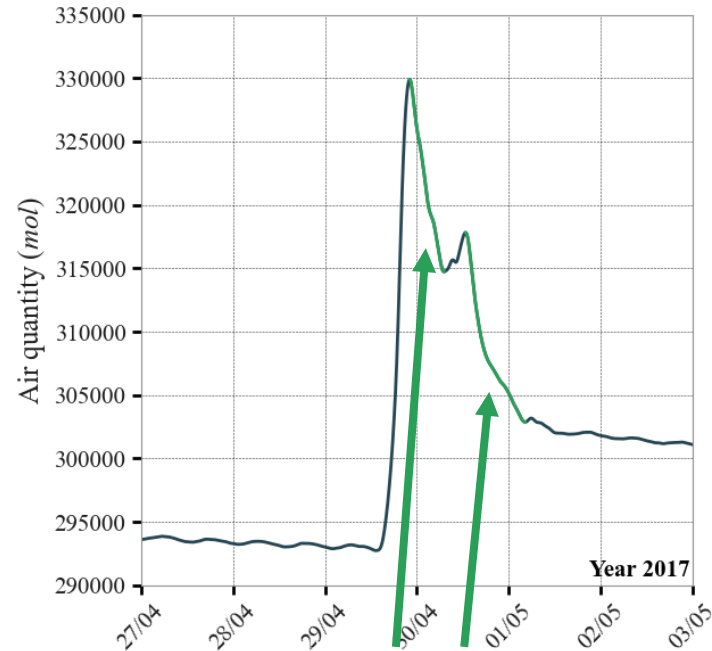
1^{re} étape : définir les évènements de mise en pression



Définition

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

1^{re} 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

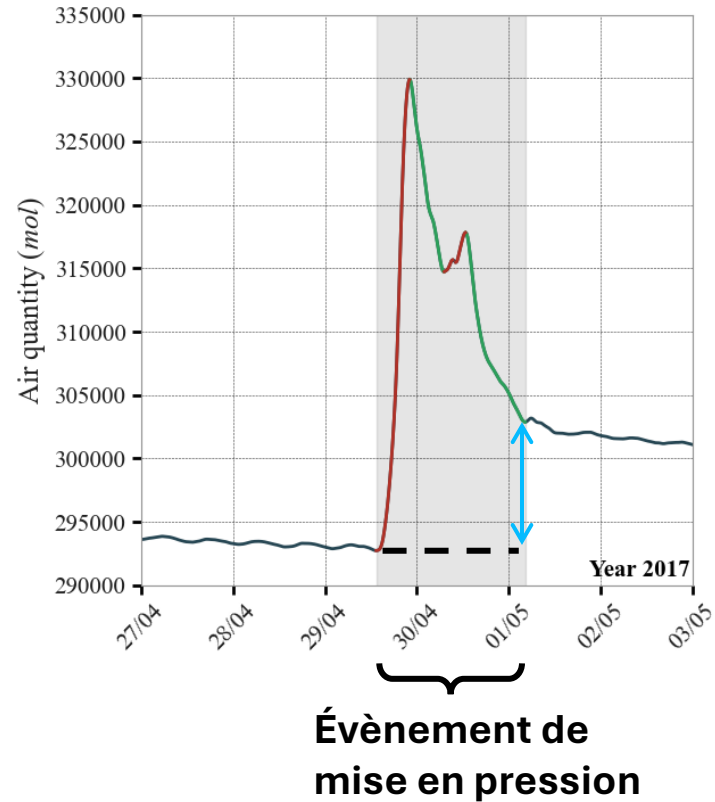
Cas d'étude

Matériel et données

1 Hydroclim. et perméa

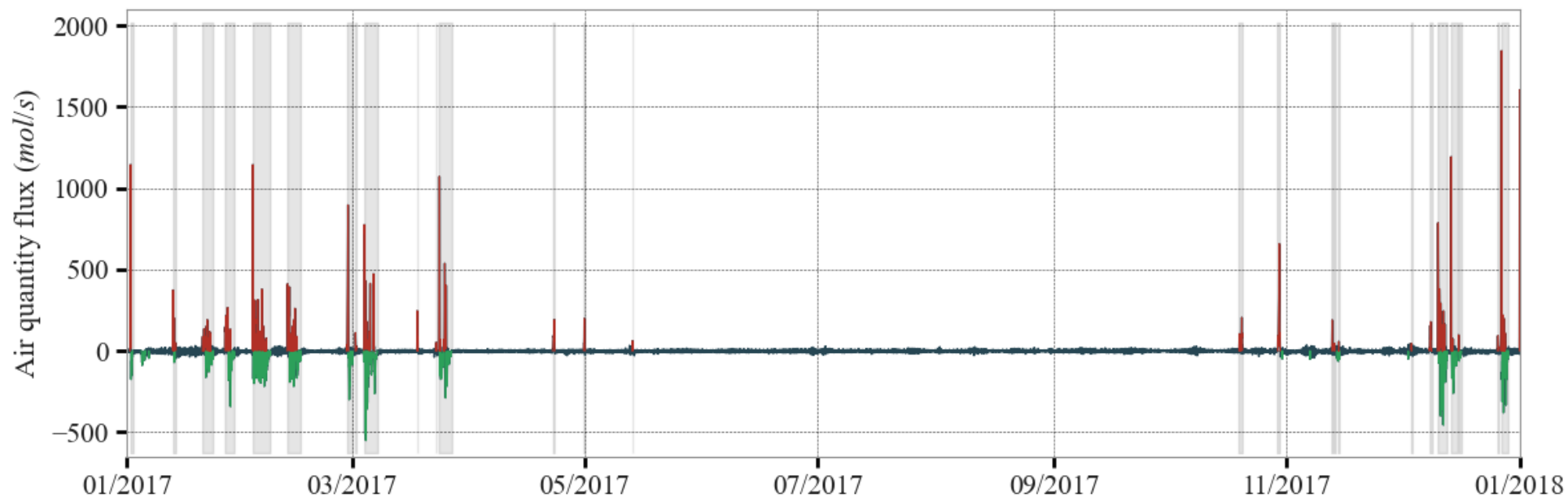
2 Hydroclim. vs Océano.

1^{re} 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**Algorithme pour automatiser l'identification des 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

Cas
d'étude

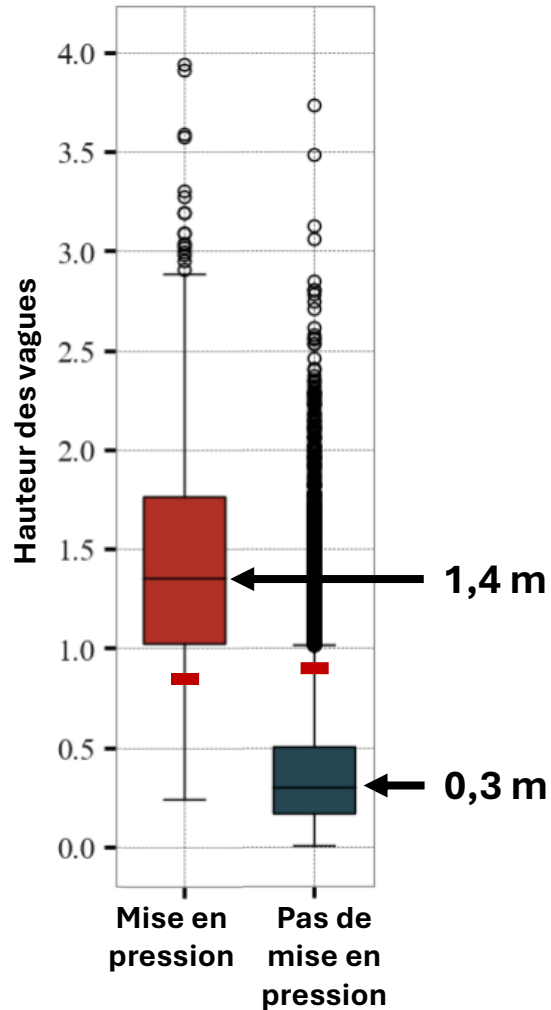
Matériel
et
données

1

Hydroclim.
et
perméa

2

Hydroclim.
vs
Océano.

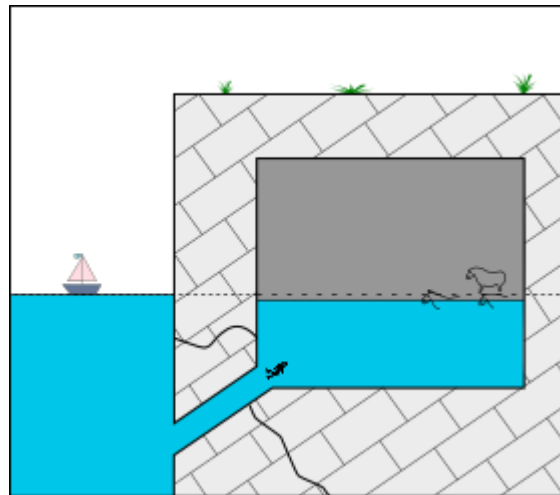
3^e étape : comparaison avec les données océanographiques – hauteur des vagues

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

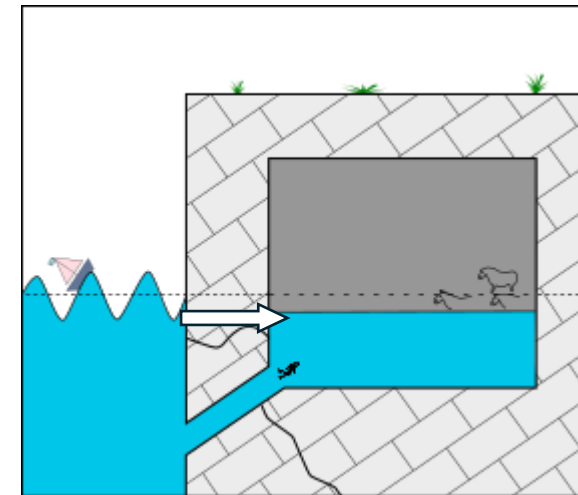
Durant évènement de mise en pression : 90 % des vagues > 0,8 m

→ principal moteur à la mise en pression de la grotte

Pas de vagues

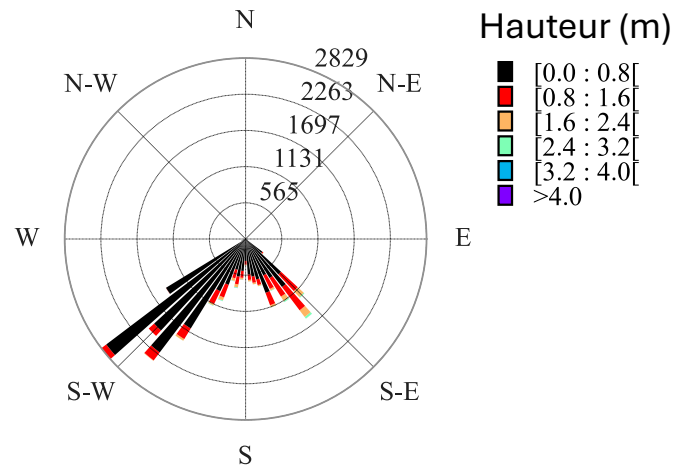


Vagues > seuil

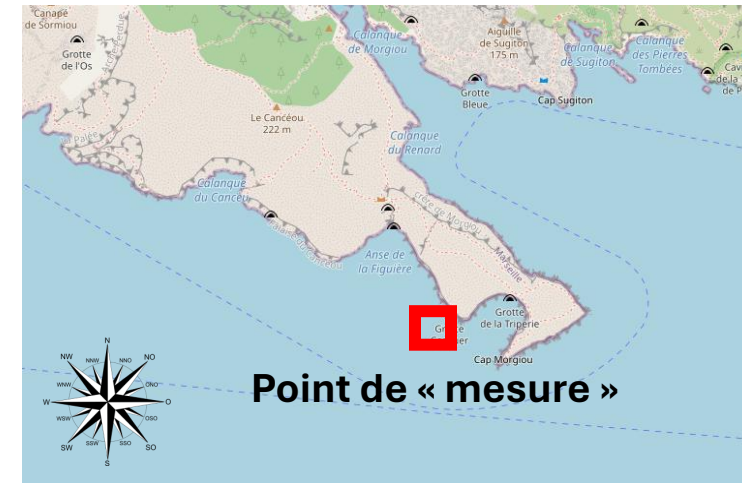


3^e étape : comparaison avec les données océanographiques – direction des vagues

Toutes les données
(2015-2023)

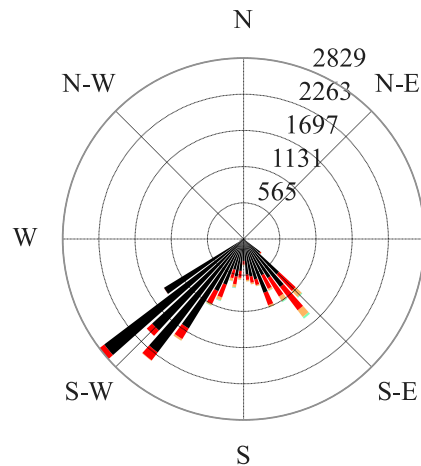


Vagues SO dominantes



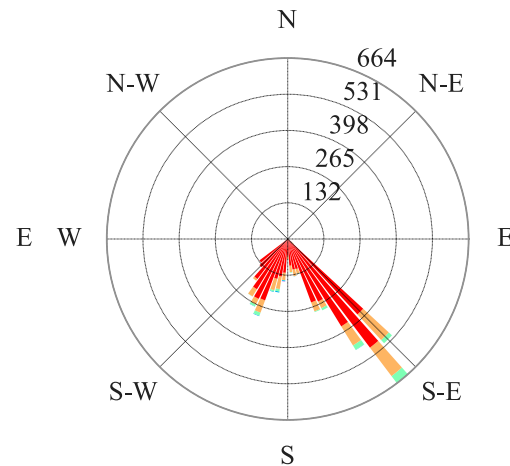
3^e étape : comparaison avec les données océanographiques – direction des vagues

Toutes les données
(2015-2023)



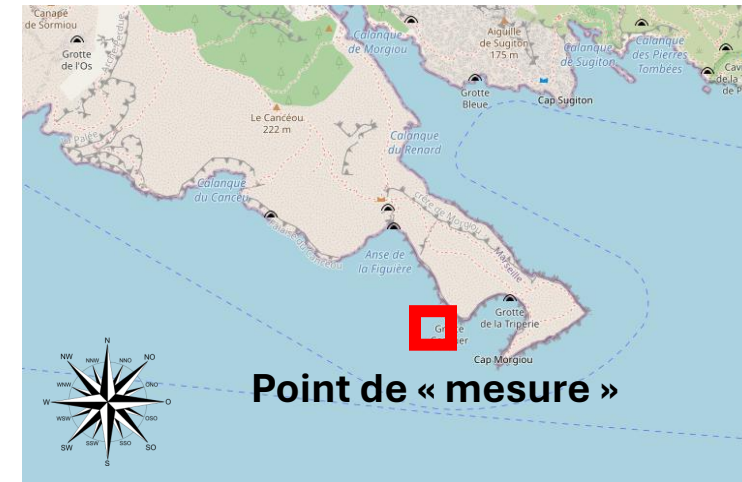
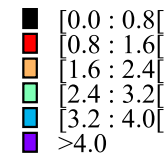
Vagues SO dominantes

Vagues $\geq 0,8\text{m}$



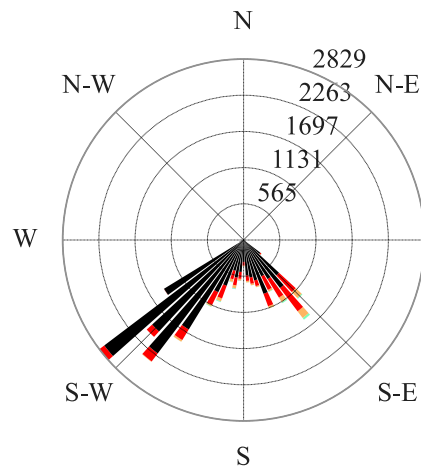
Vagues $> 0,8\text{ m}$
SE dominantes

Hauteur (m)



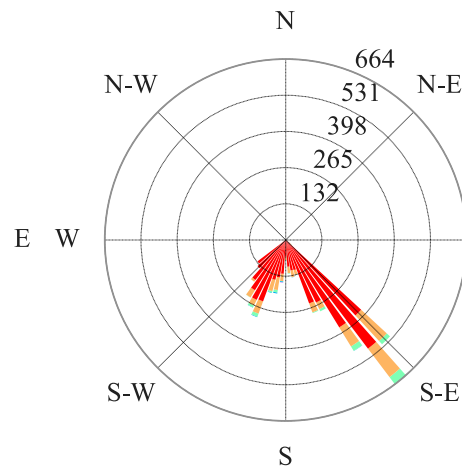
3^e étape : comparaison avec les données océanographiques – direction des vagues

Toutes les données
(2015-2023)



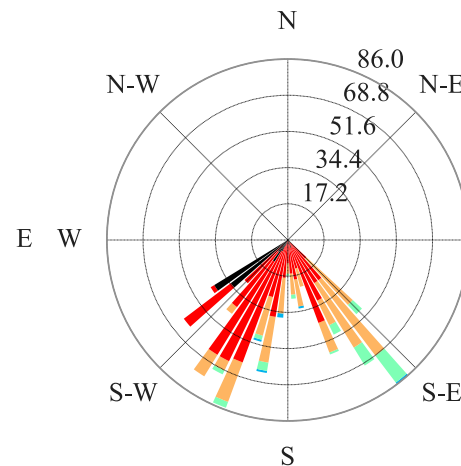
Vagues SO dominantes

Vagues $\geq 0,8$ m

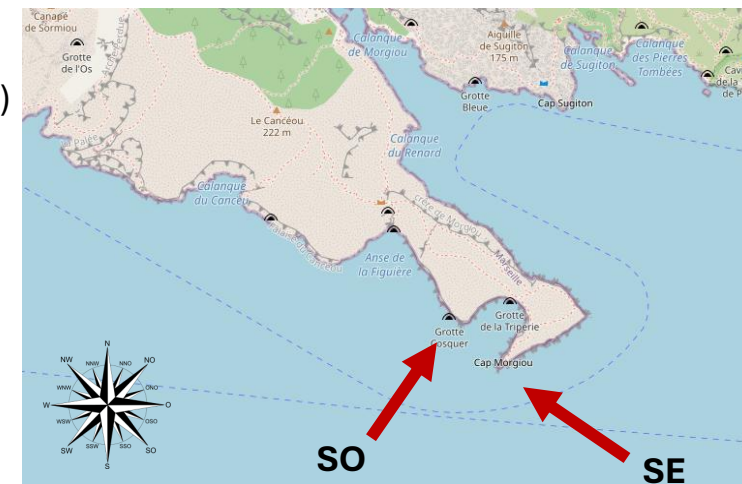


Vagues $> 0,8$ m
SE dominantes

Entrées d'air



Entrées d'air
SO dominantes



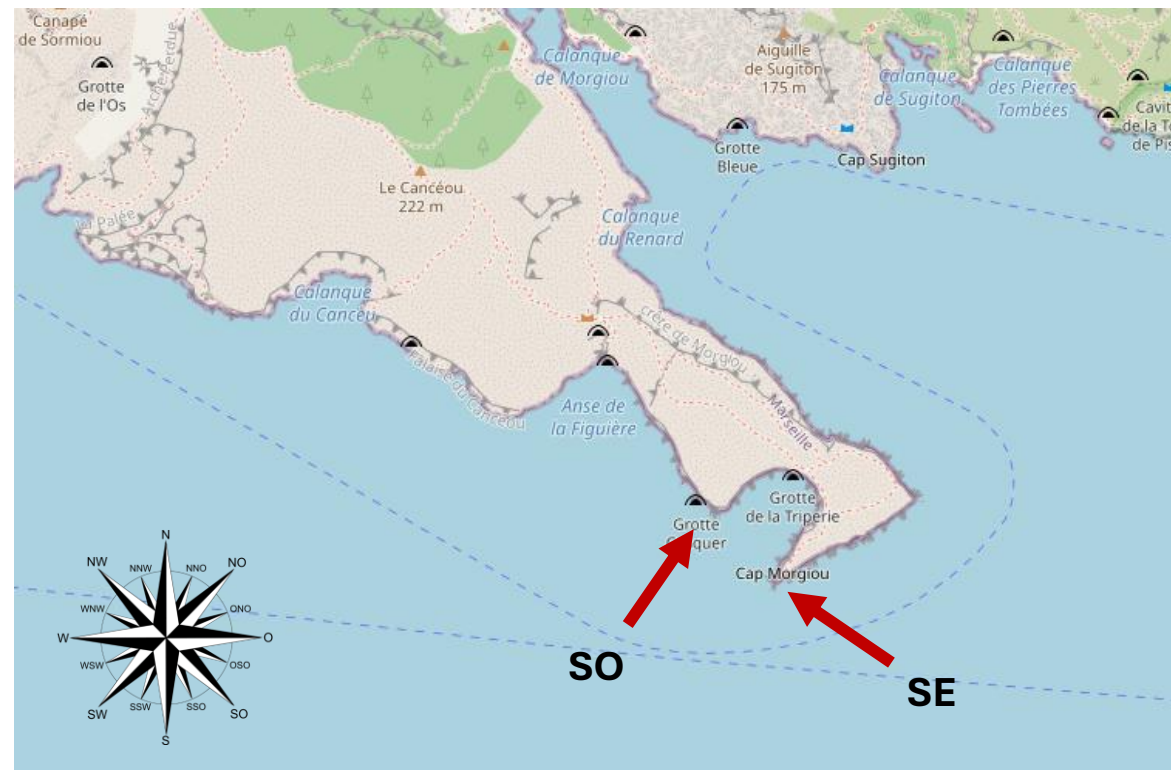
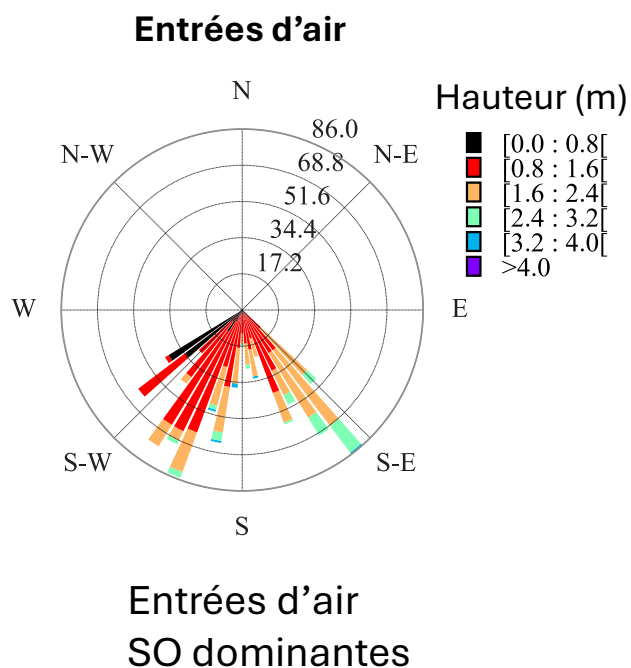
Cas
d'étude

Matériel
et
données

1
Hydroclim.
et
perméa

2
Hydroclim.
vs
Océano.

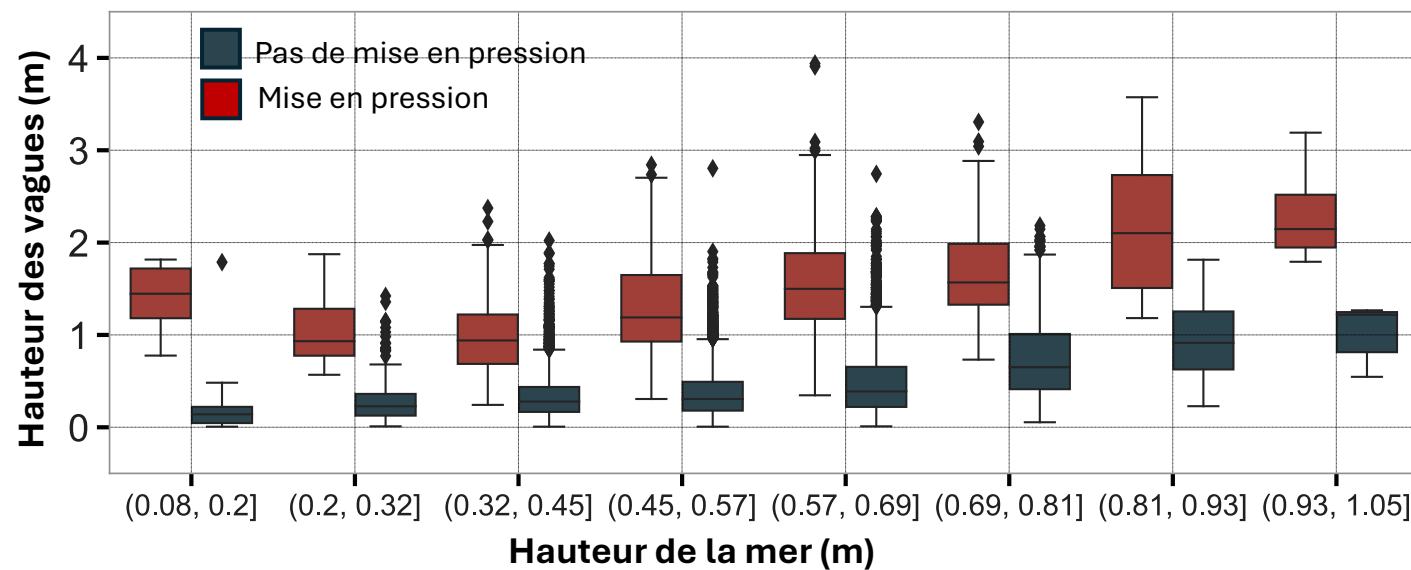
3^e étape : comparaison avec les données océanographiques – direction des vagues



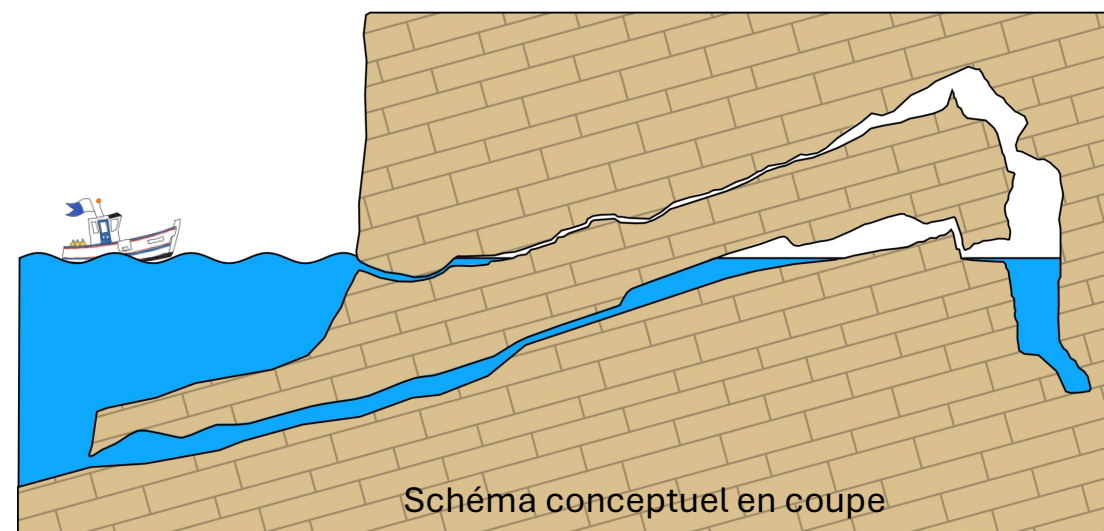
→ Vagues SO plus favorables : perpendiculaires à la paroi

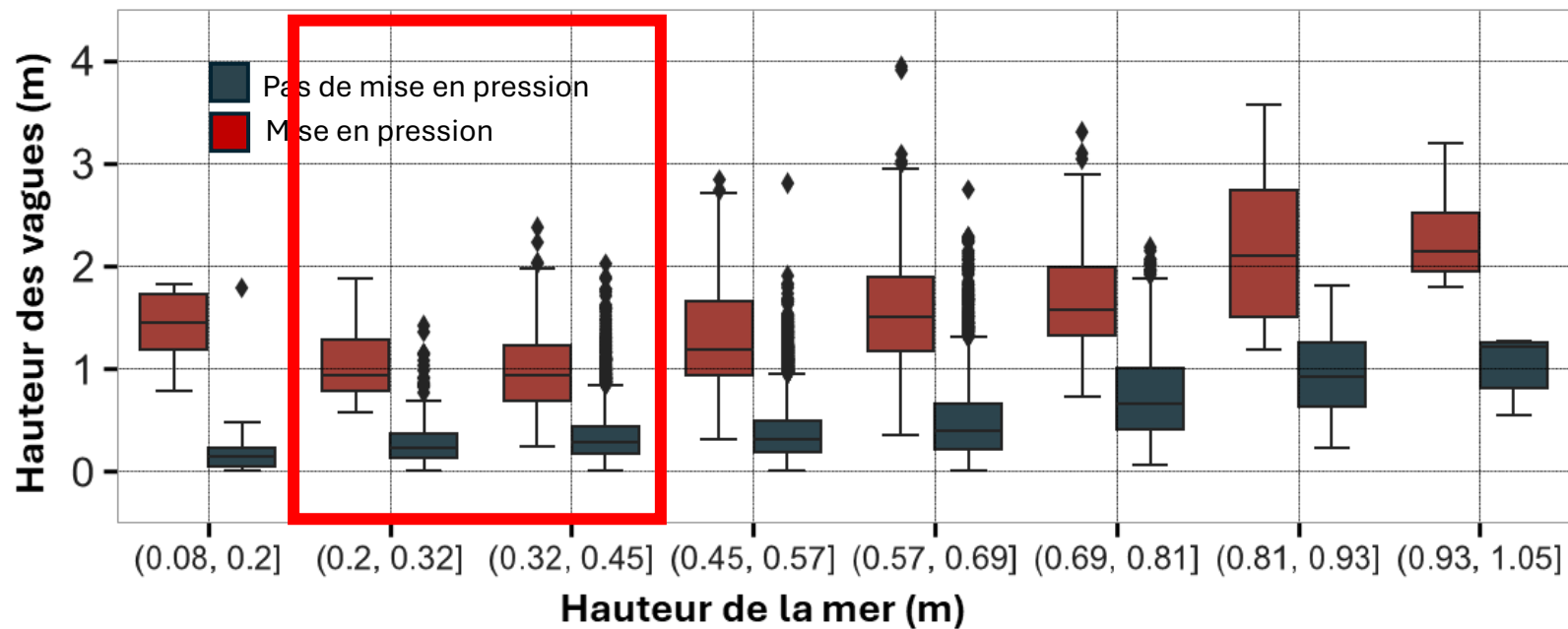
→ Vagues SE moins favorables : parallèles à la paroi

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

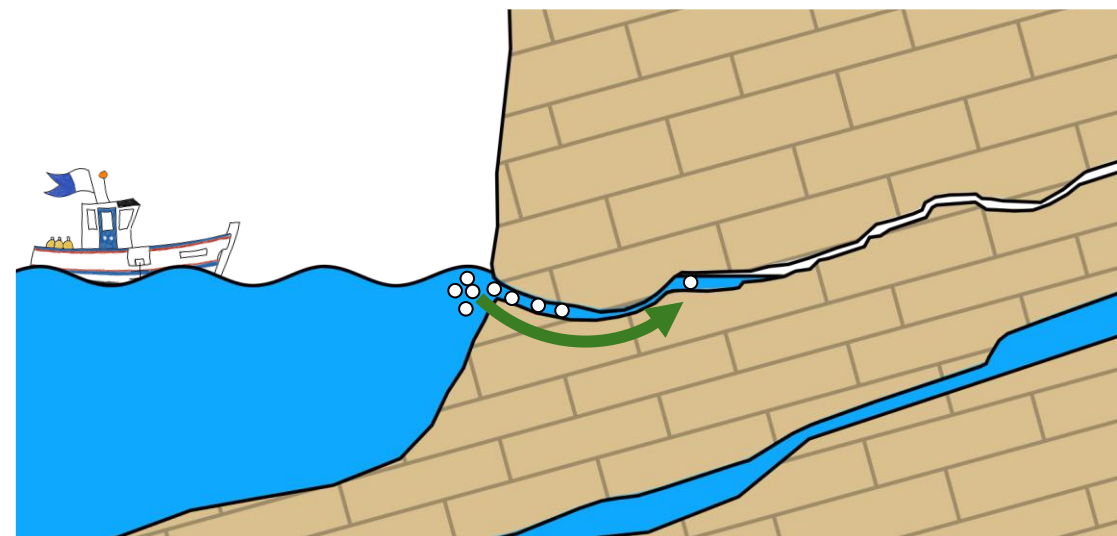


Mer haute associée à des vagues hautes (tempêtes)

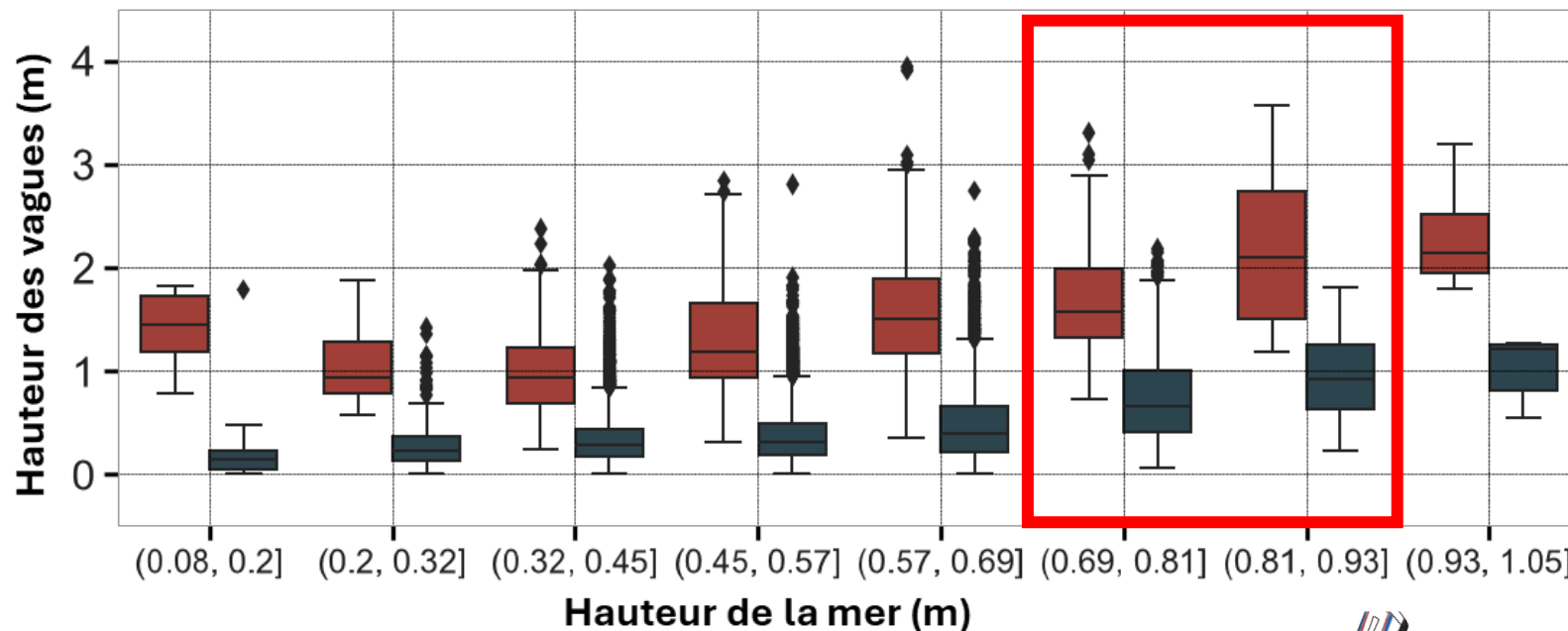


3^e étape : comparaison avec les données océanographiques – hauteur de la mer

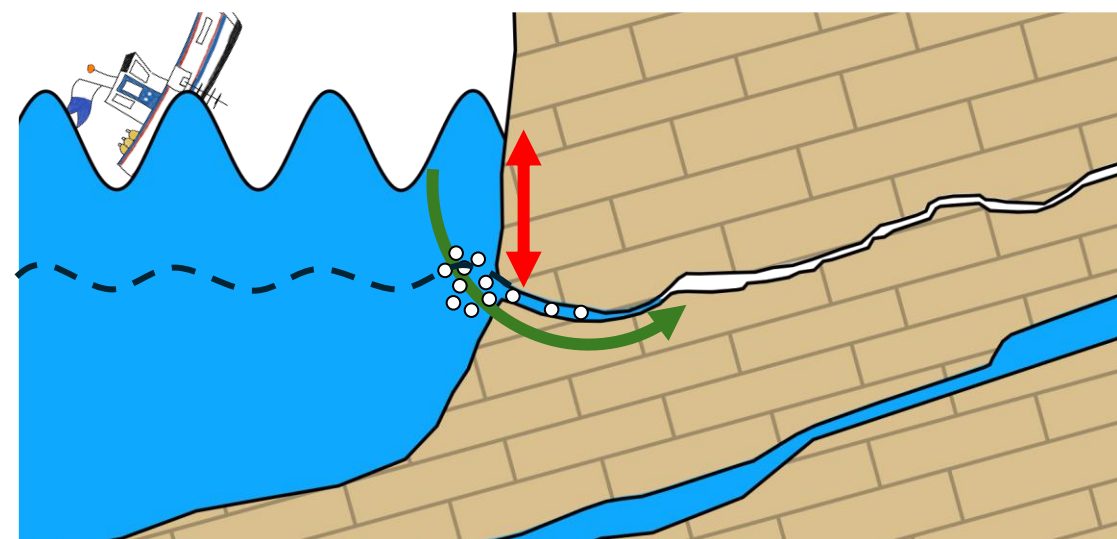
- Mer basse = vagues plus basses suffisantes pour faire entrer l'air

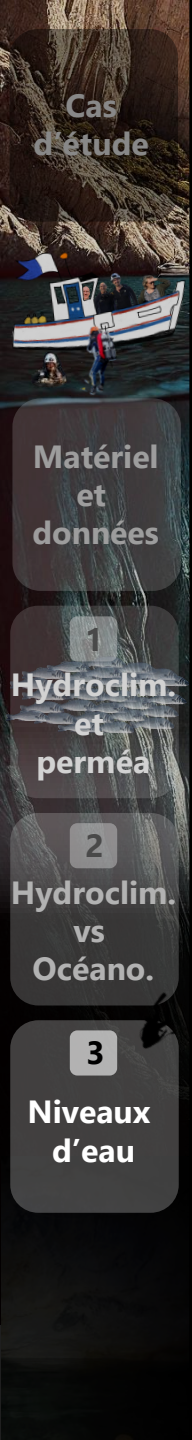


3^e étape : comparaison avec les données océanographiques – hauteur de la mer



- 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.

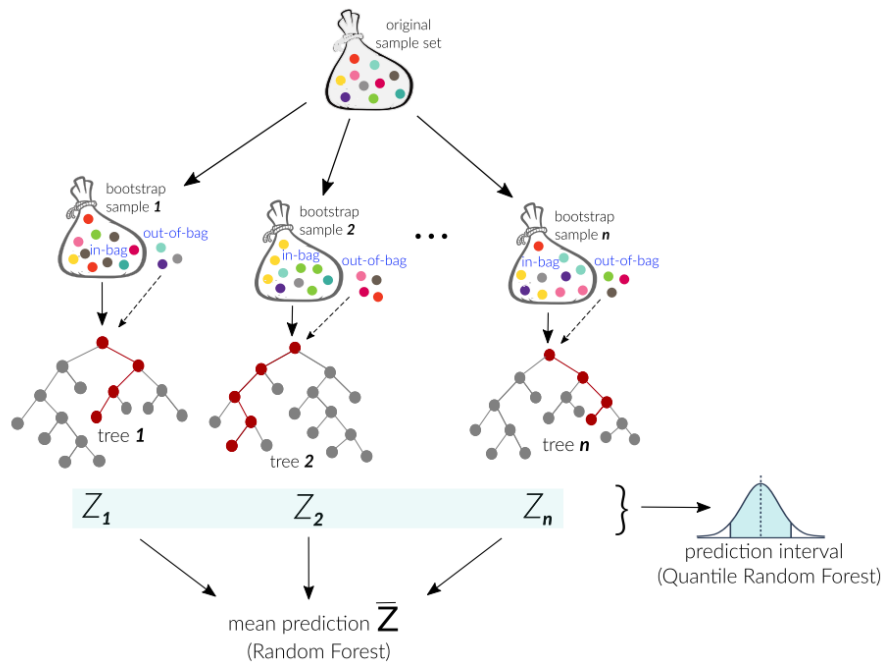
3

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)



Cas
d'étude

Matériel
et
données

1
Hydroclim.
et
perméa

2
Hydroclim.
vs
Océano.

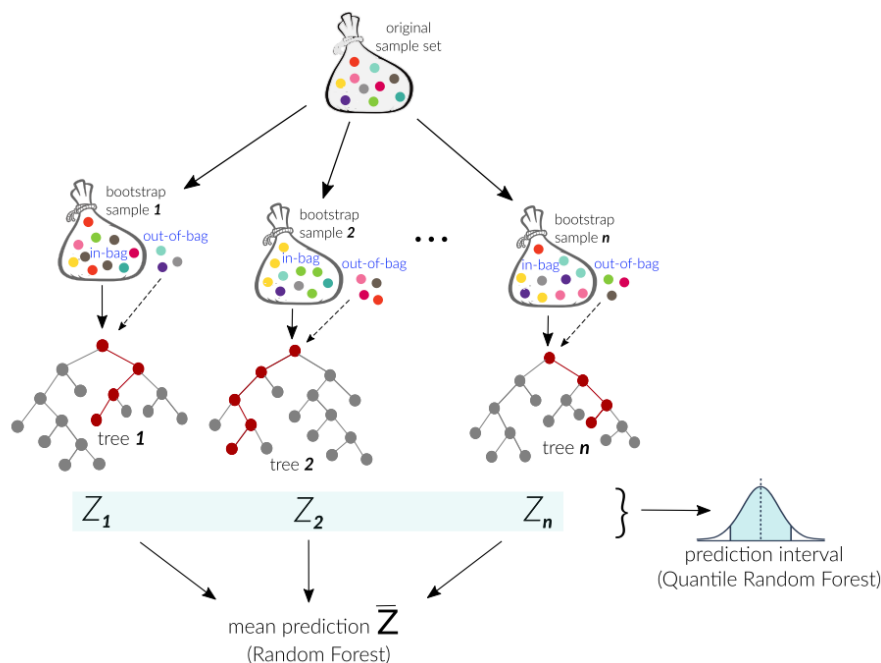
3
Niveaux
d'eau

Cas
d'étudeMatériel
et
données1
Hydroclim.
et
perméa2
Hydroclim.
vs
Océano.3
Niveaux
d'eau

Baisse des niveaux d'eau : approche statistique

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

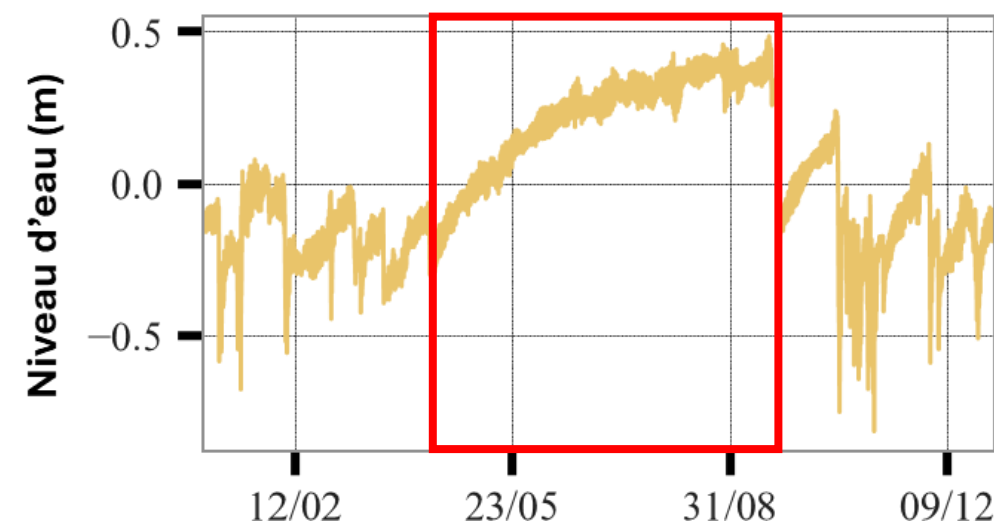
Modèle : Random Forest (Breiman, 2001)



Montée des niveaux d'eau : approche physique

Remontée estivale des plans d'eau

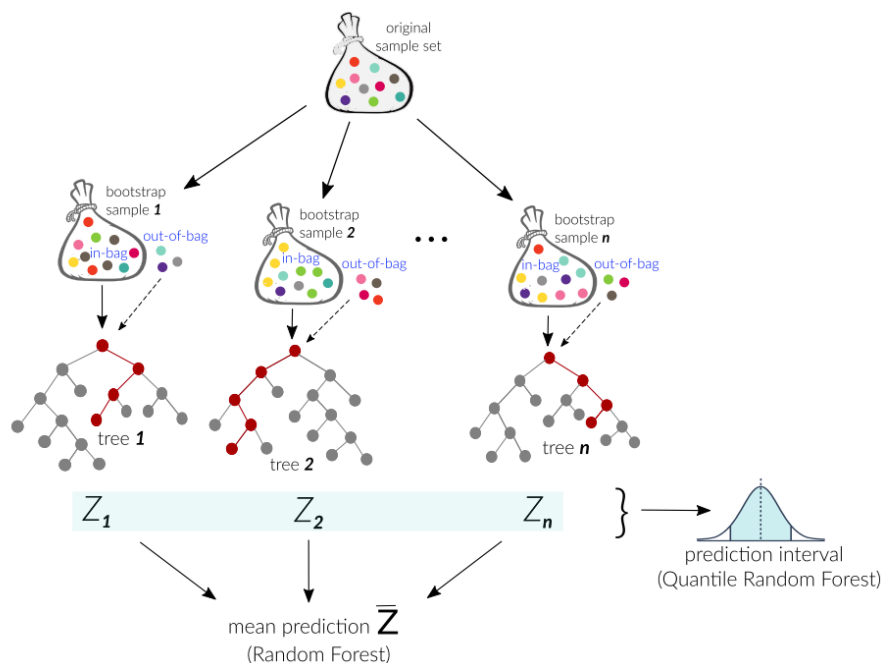
Solution de la forme : $h_w(t) = -\Delta h_w(t_0) e^{-\alpha t} + h_w(\infty)$



Baisse des niveaux d'eau : approche statistique

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

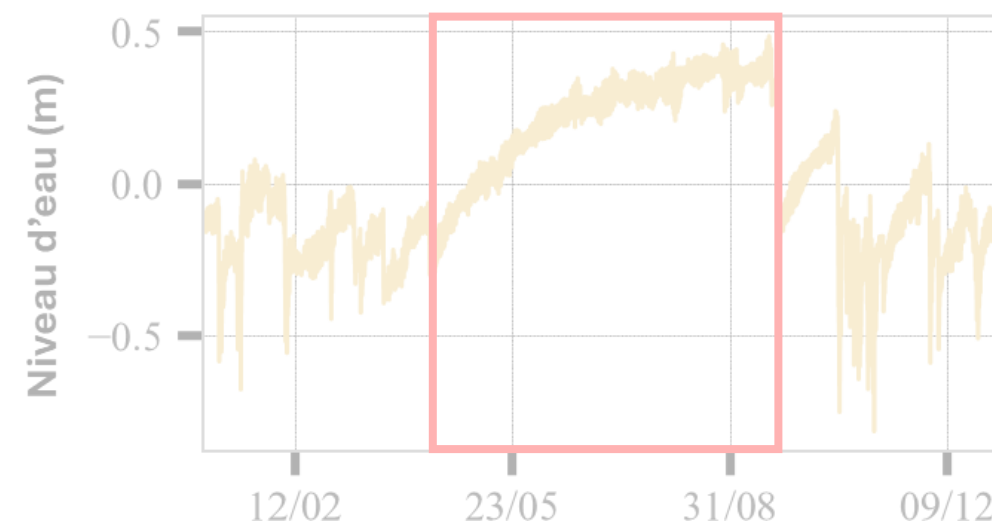
Modèle : Random Forest (Breiman, 2001)



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

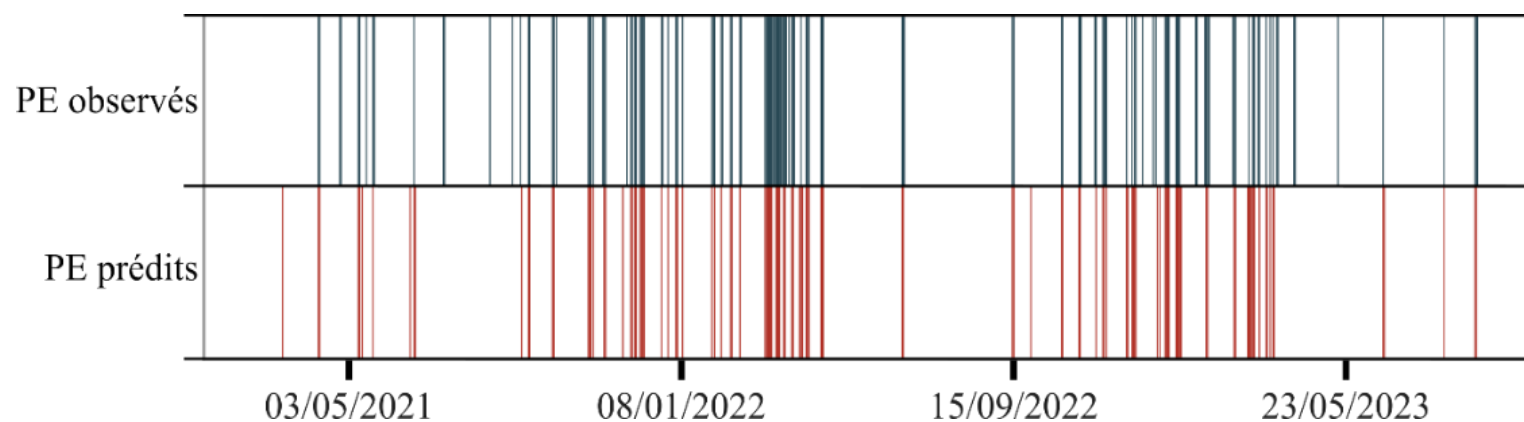
- Hauteur des vagues
- Direction des vagues
- Hauteur de la mer

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	PE	\overline{PE}	
	0.7	0.3	
\overline{PE}	0.028	0.97	
	PE	\overline{PE}	classes prédite

F1-score : 0,70

Cas
d'étude

Matériel
et
données

1

Hydroclim.
et
perméa

2

Hydroclim.
vs
Océano.

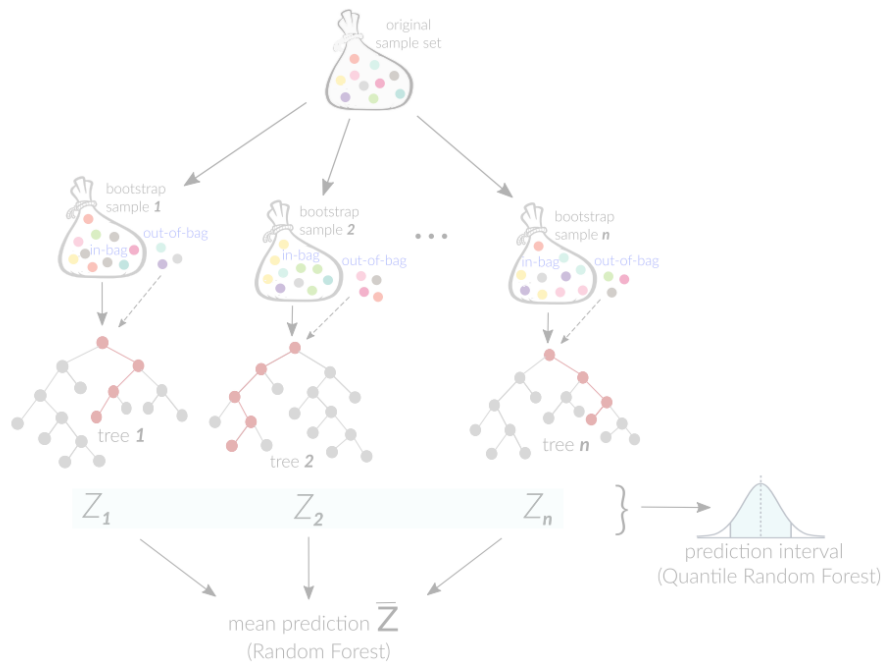
3

Niveaux
d'eau

Baisse des niveaux d'eau : approche statistique

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

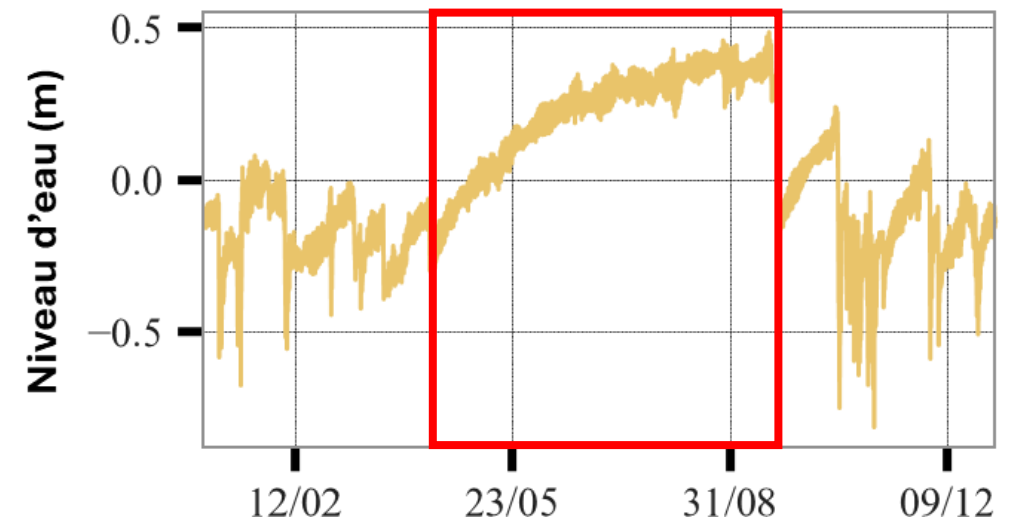
Modèle : Random Forest (Breiman, 2001)



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

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

Solution

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



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

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

Cas
d'étude

Matériel
et
données

1

Hydroclim.
et
perméa

2

Hydroclim.
vs
Océano.

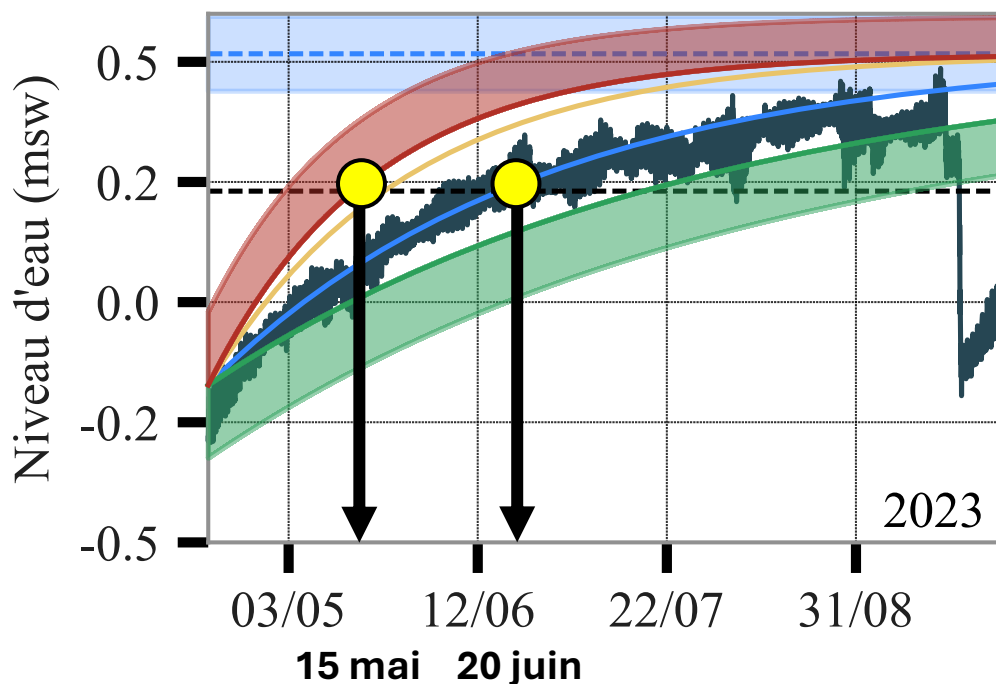
3

Niveaux
d'eau

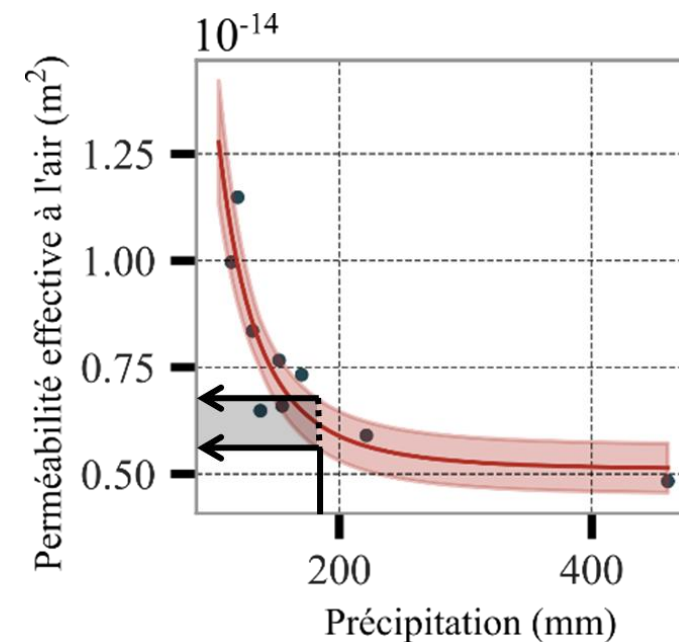
Montée des niveaux d'eau : approche physique

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**

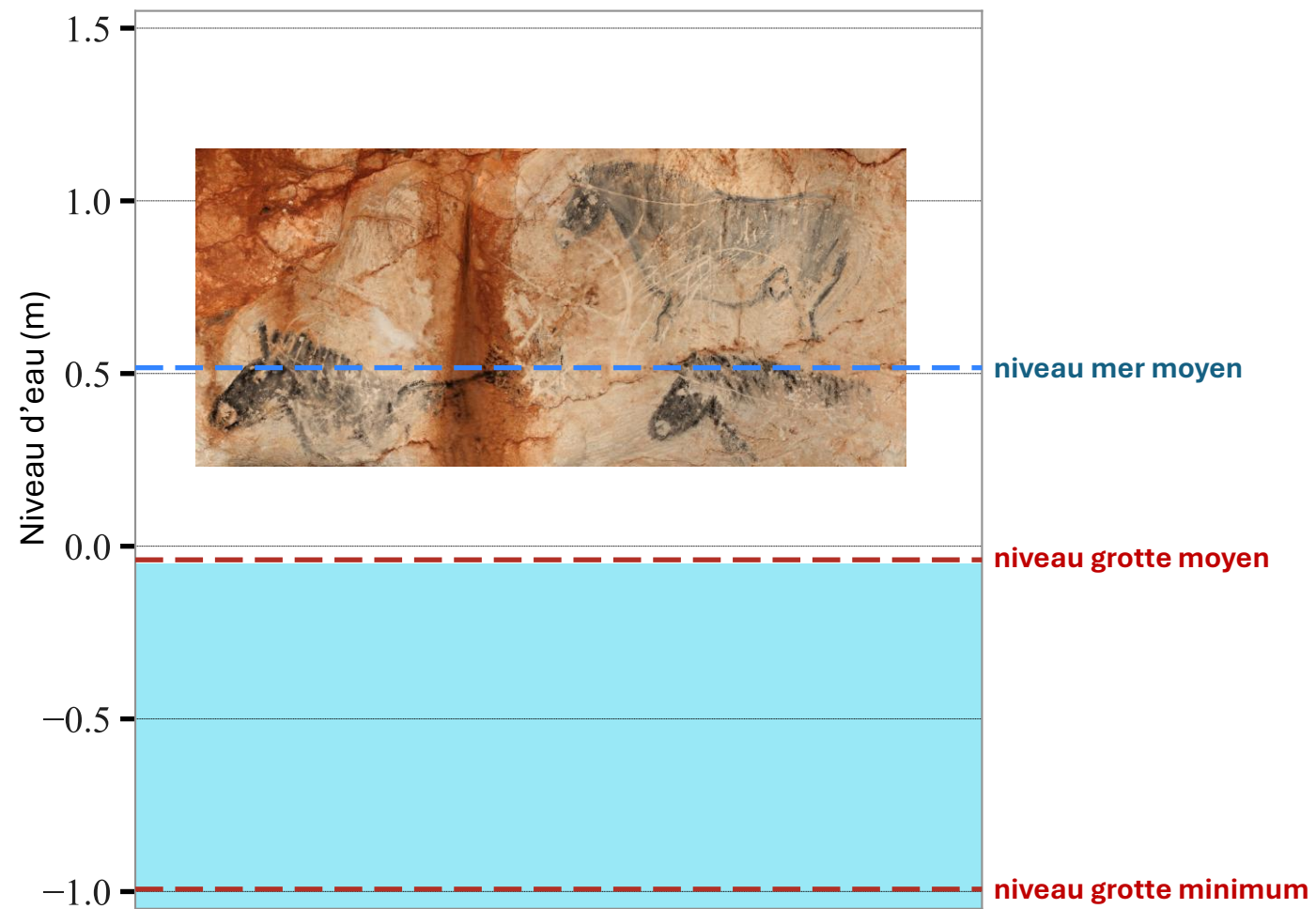


Sècheresse
Sec
Humide
Pluvieux



**Remontée très rapide des
niveaux d'eau les années sèches**

Contexte de changement climatique



Cas
d'étude

Matériel
et
données

1

Hydroclim.
et
perméa

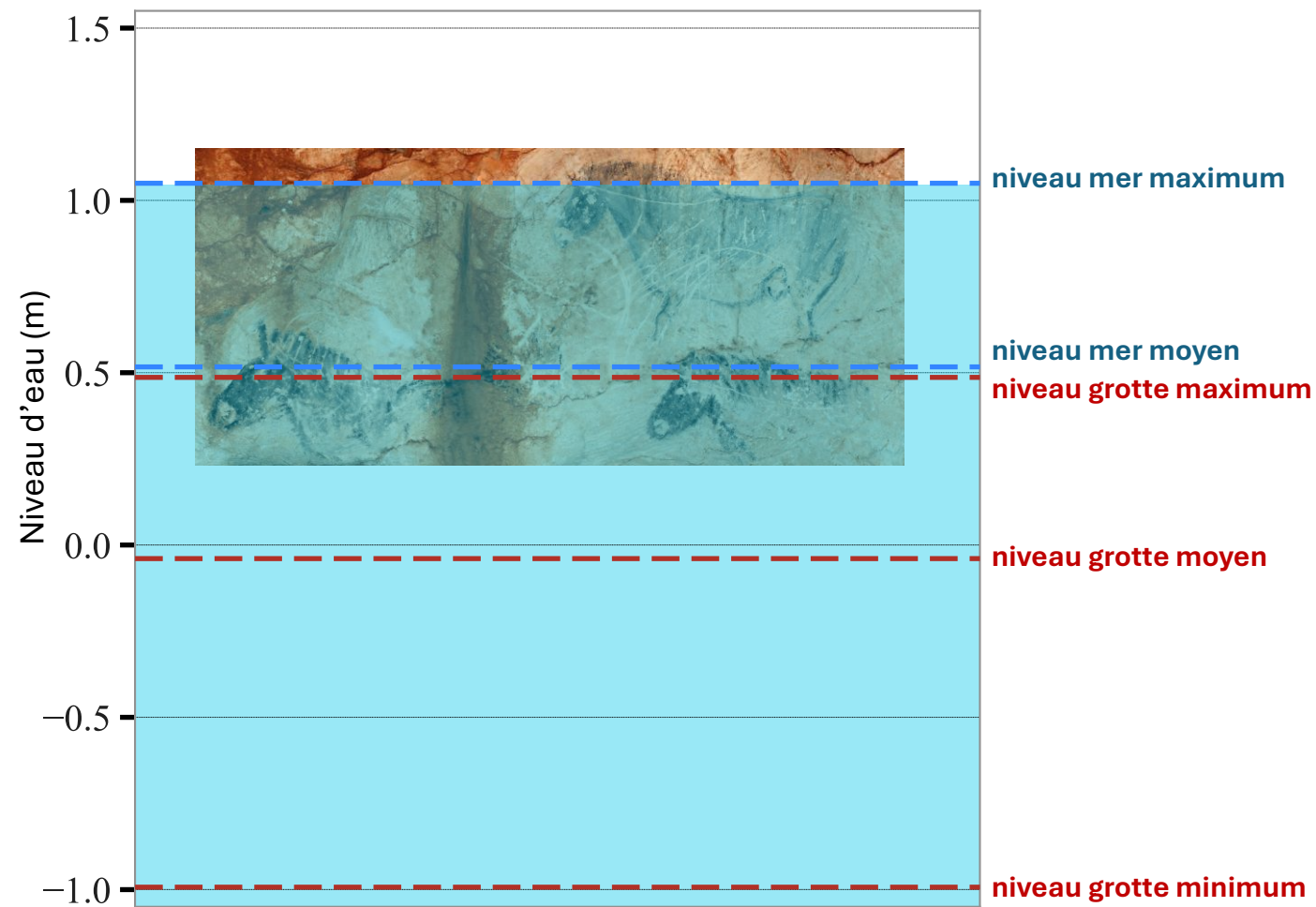
2

Hydroclim.
vs
Océano.

3

Niveaux
d'eau

Contexte de changement climatique



Cas
d'étude

Matériel
et
données

1

Hydroclim.
et
perméa

2

Hydroclim.
vs
Océano.

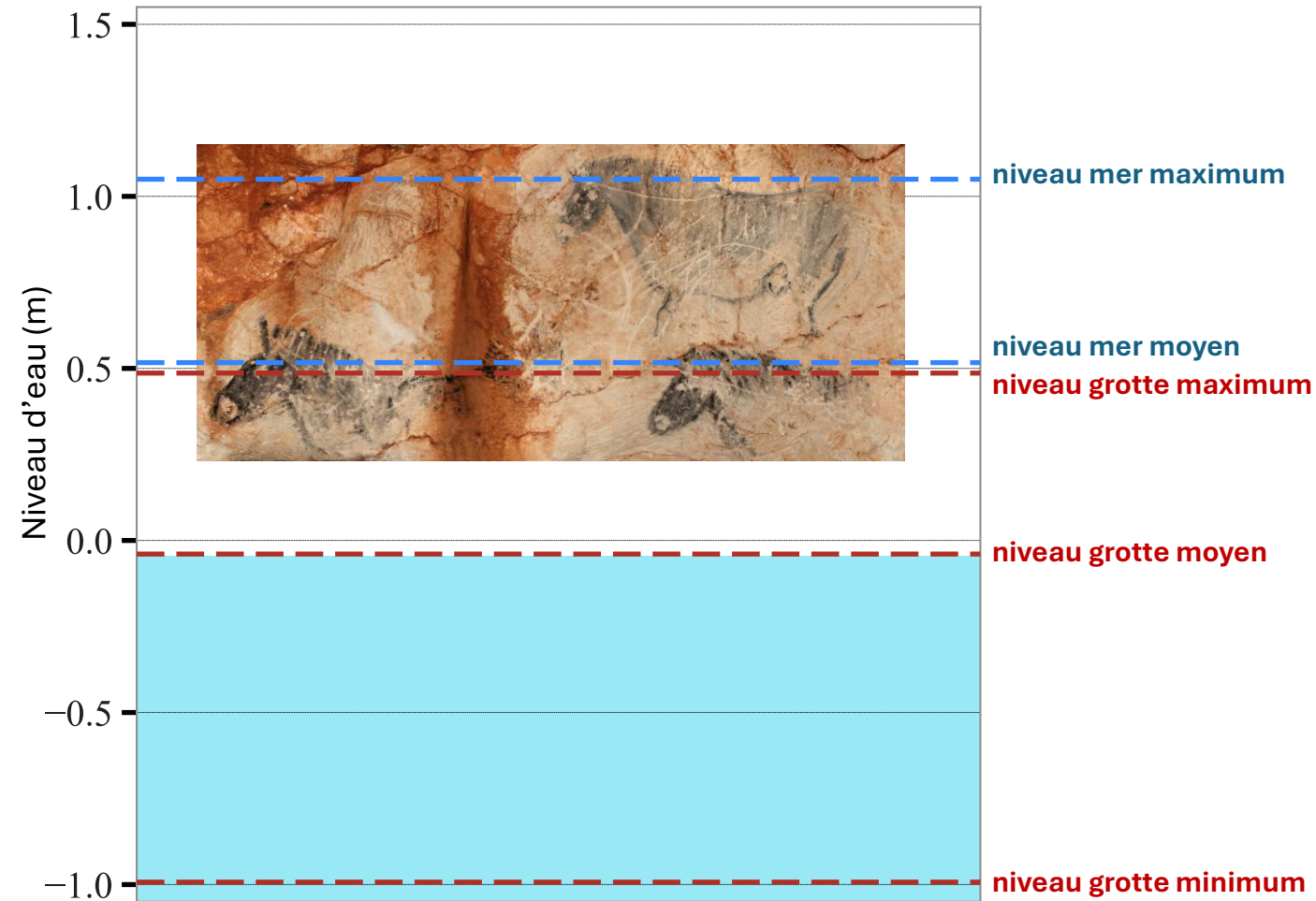
3

Niveaux
d'eau

Cas
d'étude**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'ennuiement plus longues**
- **Niveau maximum plus élevé**

Matériel
et
données

1

Hydroclim.
et
perméa

2

Hydroclim.
vs
Océano.

3

Niveaux
d'eau

Cas
d'étudeMatériel
et
données

1

Hydroclim.
et
perméa

2

Hydroclim.
vs
Océano.

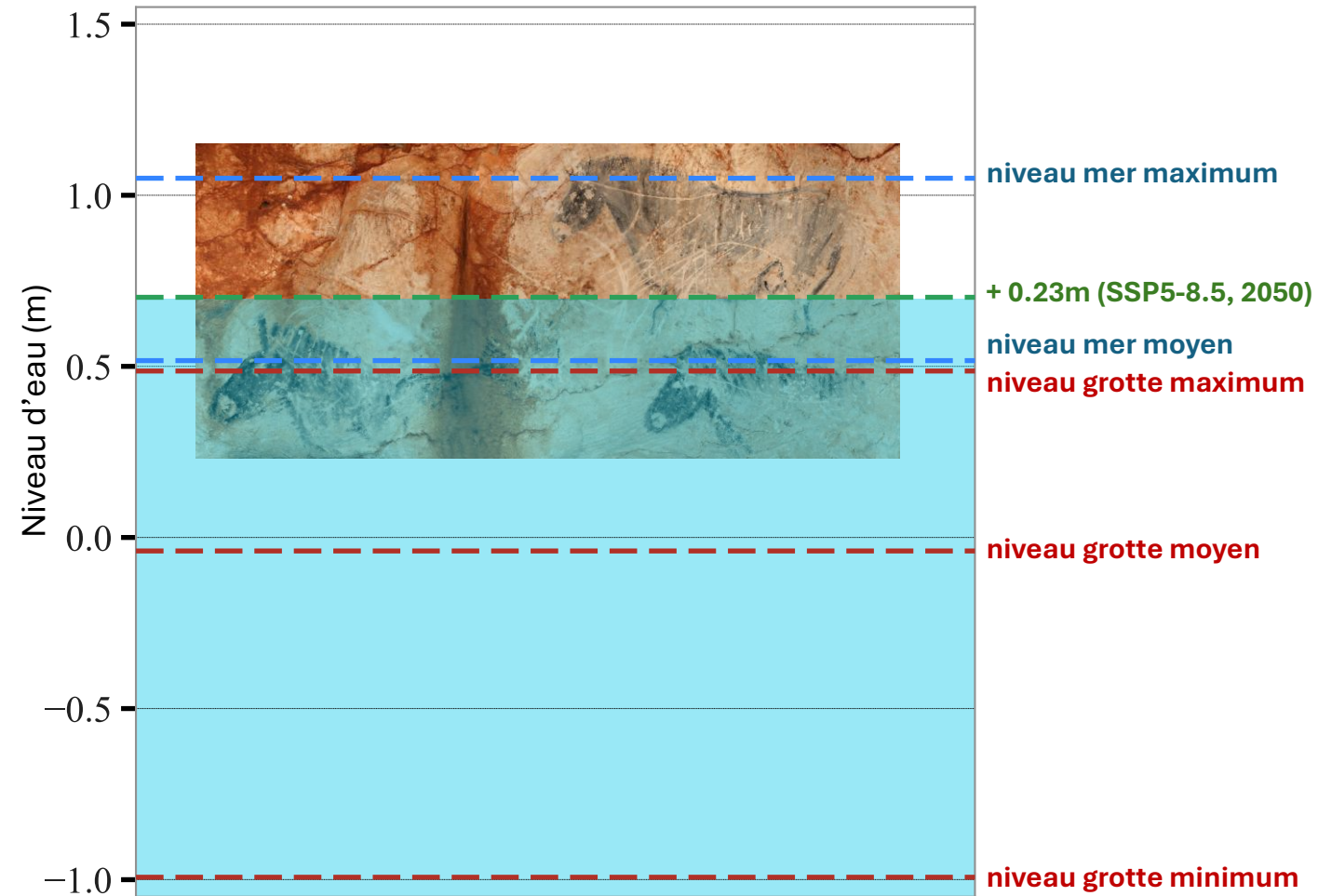
3

Niveaux
d'eau

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**

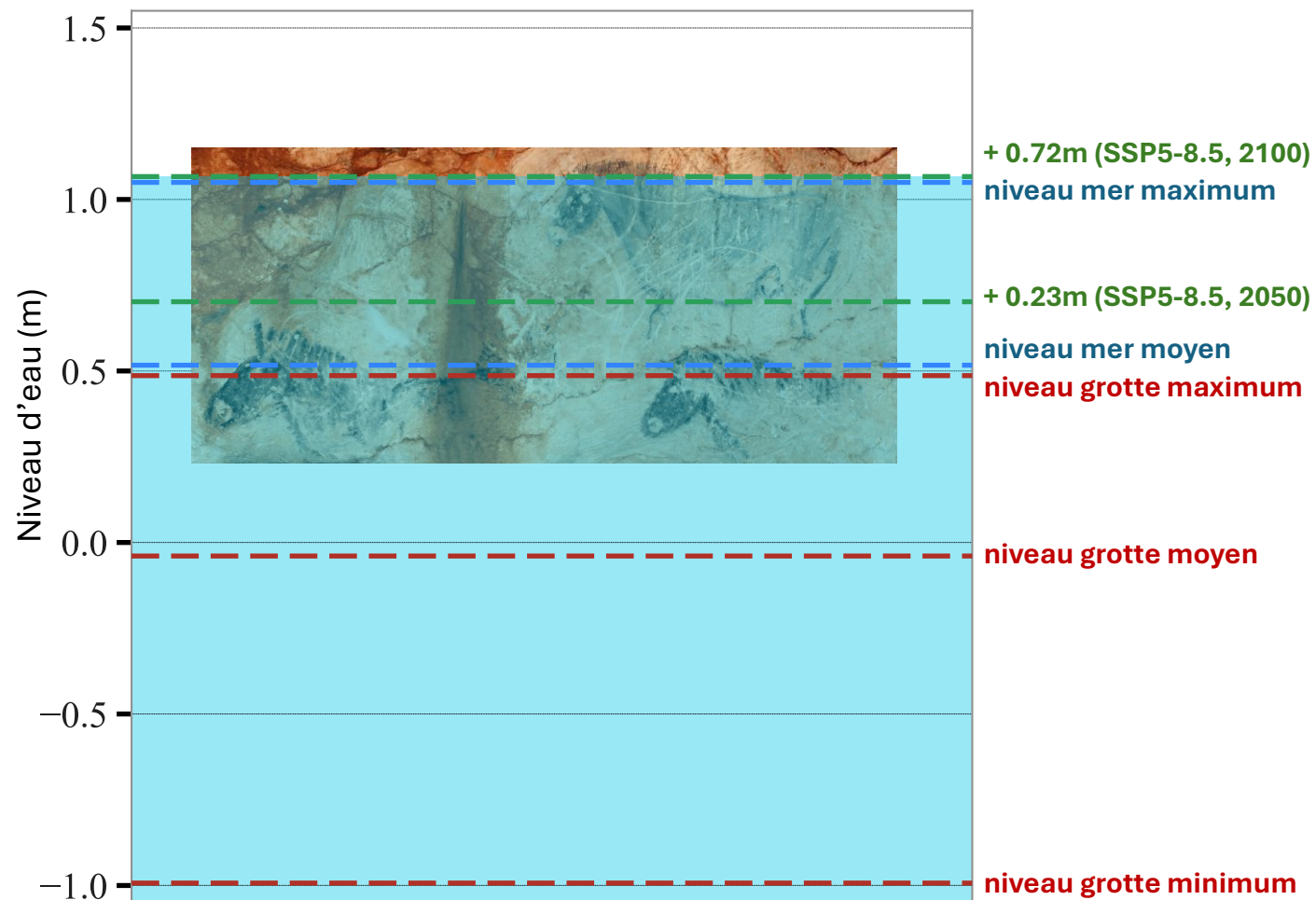


Cas
d'étude

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**

Matériel
et
données

1

Hydroclim.
et
perméa

2

Hydroclim.
vs
Océano.

3

Niveaux
d'eau

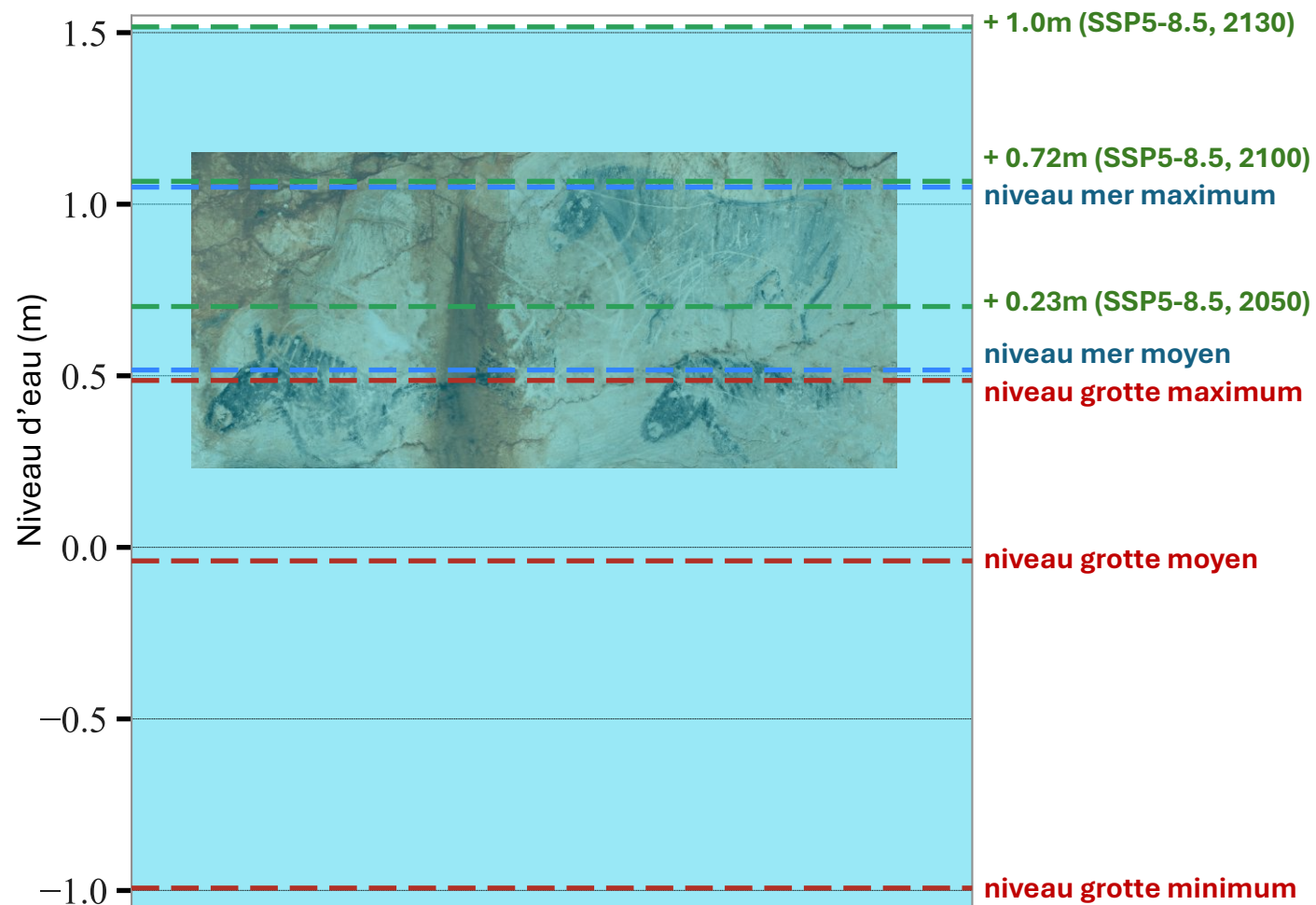
Cas
d'étude

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

Matériel
et
données

1

Hydroclim.
et
perméa

2

Hydroclim.
vs
Océano.

3

Niveaux
d'eau

Conclusion : fonctionnement hydroclimatique

Trois échelles de variation de la pression

Évènements de mise en pression (automne – hiver)

Lente baisse de la pression (Printemps – été)

Marées

Débits d'air

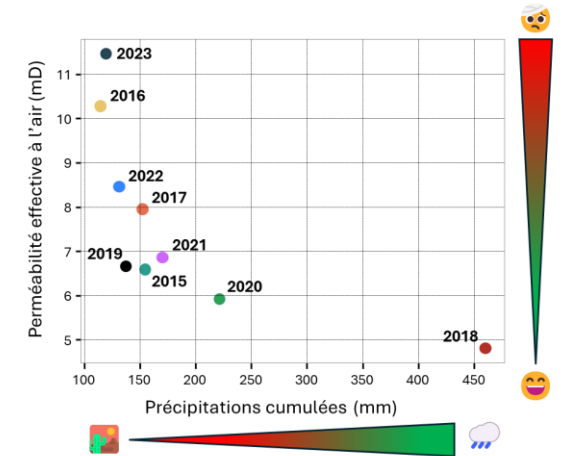
Volume

Conduits karstiques noyés

À travers le massif calcaire

Perméabilité du massif

Perméabilité du massif



Corrélation avec les précipitations

Changement climatique :

- Augmentation de la perméabilité
- Remontée rapide des plans d'eau
- Nouveaux échanges avec l'extérieur

Valable pour les grottes peu profondes

Cas d'étude

Matériel et données

1 Hydroclim. et perméa

2 Hydroclim. vs Océano.

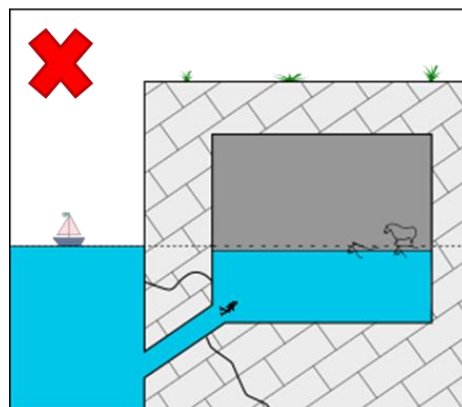
3 Niveaux d'eau

Conclusion

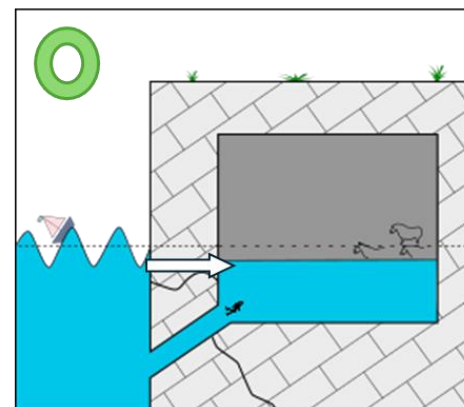
Conclusion : conditions océanographiques

Hauteur des vagues : moteur des mises en pression

Pas de vagues

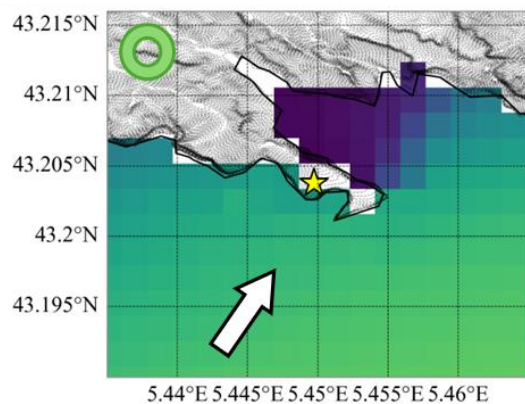


Vagues

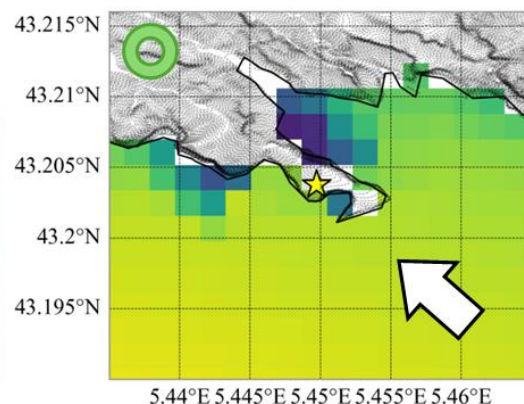


Direction des vagues

Direction SO

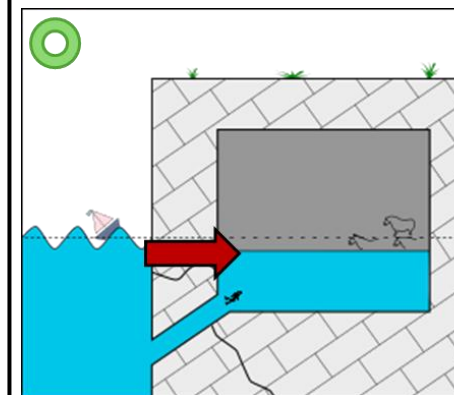


Direction SE

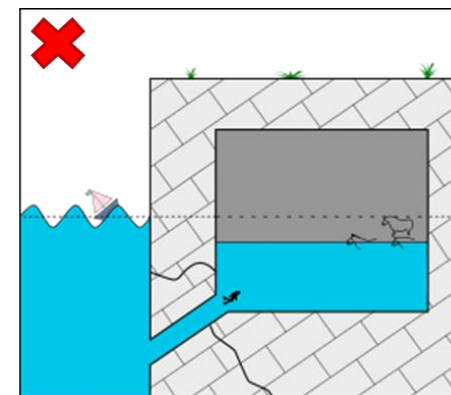


Hauteur de la mer

Mer basse



Mer haute



Cas
d'étude

Matériel
et
données

1

Hydroclim.
et
perméa

2

Hydroclim.
vs
Océano.

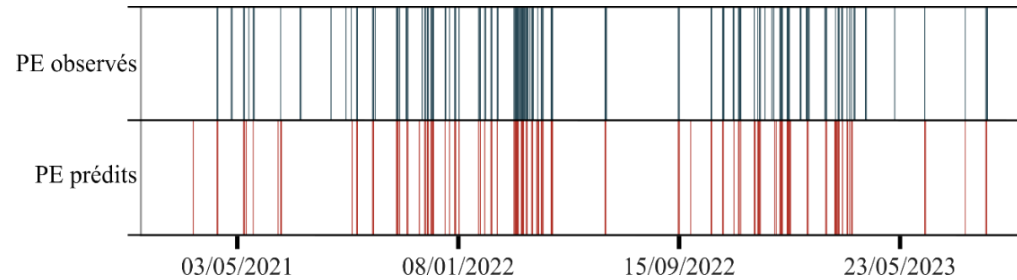
3

Niveaux
d'eau

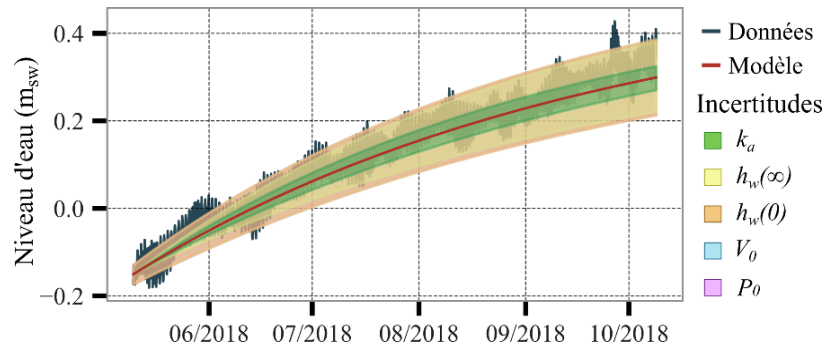
Conclusion

Conclusion : niveaux d'eau

Modèle statistique des baisses des plans d'eau

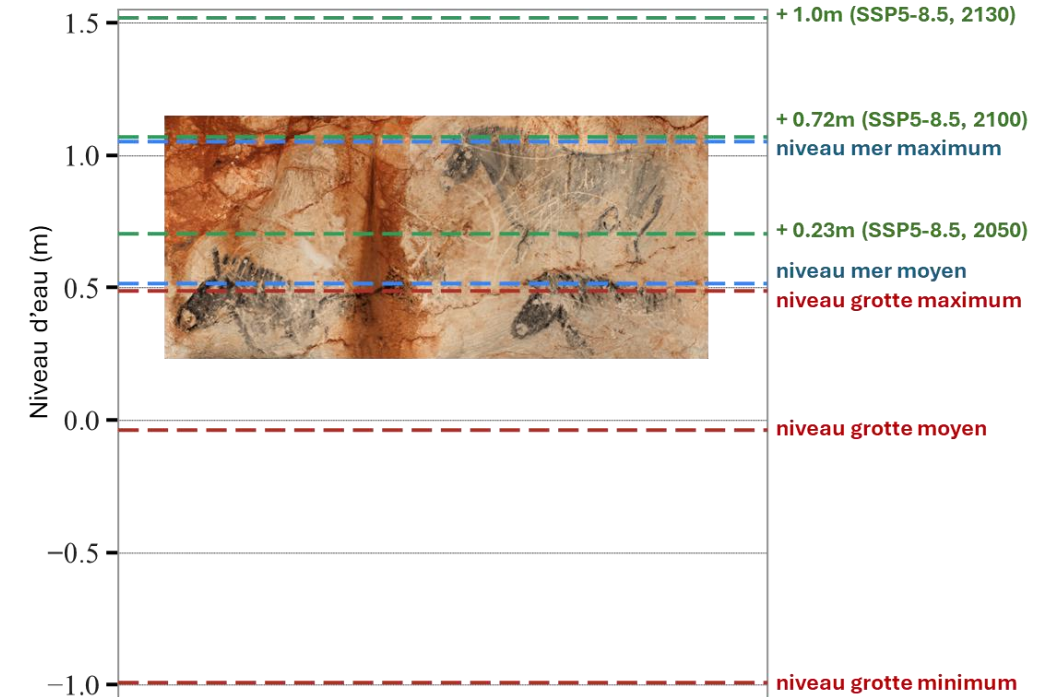


Modèle physique de la remontée des plans d'eau



Changement climatique

- Sècheresses 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



**Merci pour
votre attention**





**Merci pour
votre attention**

