

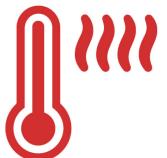
La vie dans des environnements océaniques extrêmes

ALAIN Karine

Karine.Alain@univ-brest.fr

Directrice de Recherche au CNRS - Microbiologiste
EMR 6002-BIOMEX/BEEP, CNRS-UBO-Ifremer
Biologie Interactions et adaptations des organismes en
Milieu EXtrême
Brest-Plouzané, FRANCE

Journée de la Science du CNES, 6 novembre 2025, Paris



L'océan mondial en quelques chiffres

L'océan



couvre
71% de la
surface
planétaire



produit
plus de
50% de
l'oxygène

L'océan mondial en quelques chiffres

L'océan

couvre
71% de la
surface
planétaire

produit
plus de
50% de
l'oxygène

L'océan est un régulateur essentiel du climat...

absorbe ~30% du CO₂ et
93% de l'excès de chaleur
générés par les activités
humaines

L'océan mondial en quelques chiffres

L'océan

couvre
71% de la
surface
planétaire

produit
plus de
50% de
l'oxygène

absorbe ~30% du CO₂ et
93% de l'excès de chaleur
générés par les activités
humaines

L'océan constitue le plus grand espace de vie de la planète...

Occupe un
volume de
1370
millions de
km³

abrite entre
50 et 82%
des formes
de vie
terrestre

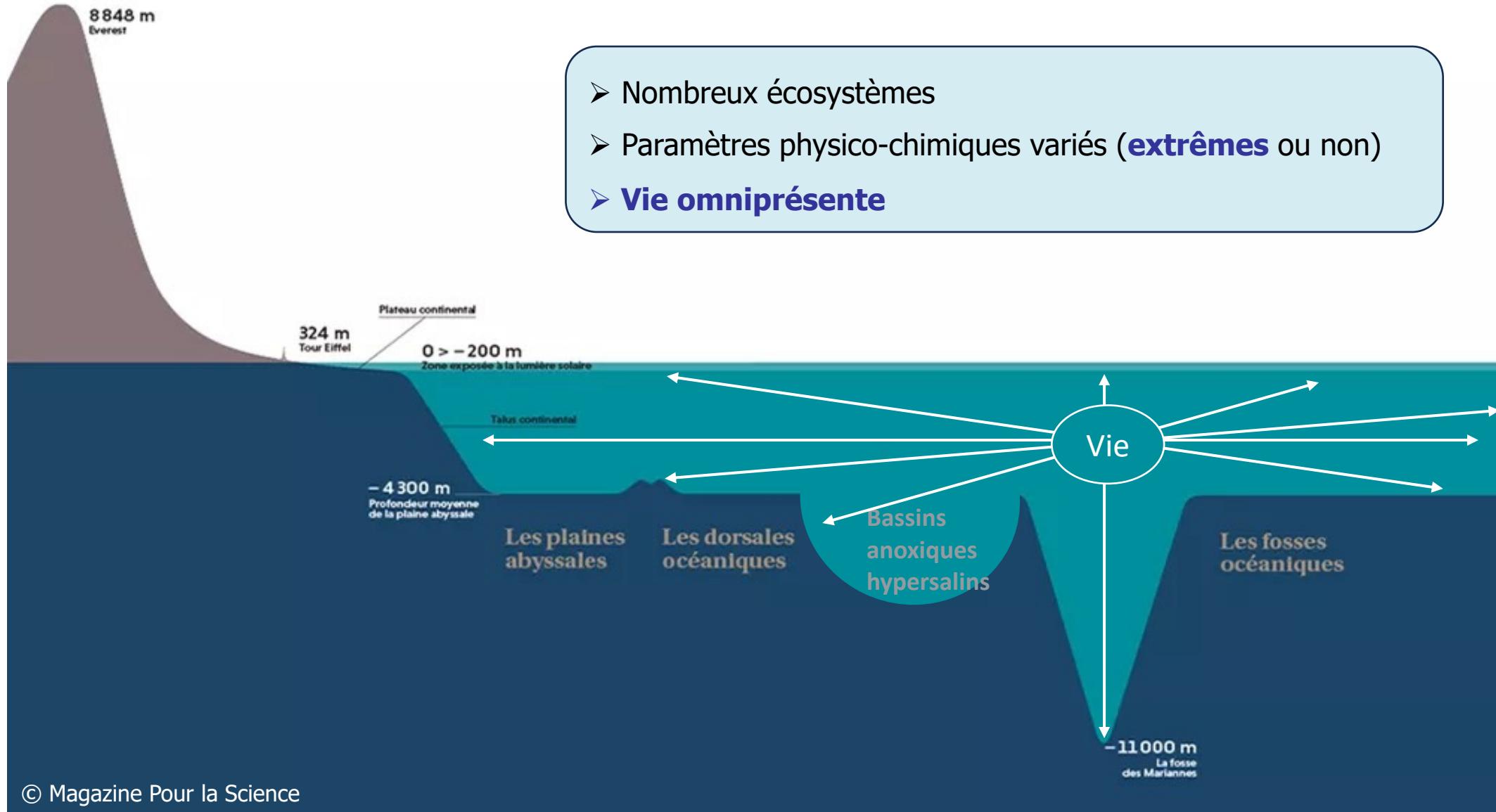
héberge
environ 2.2
millions
d'espèces

Seulement
~ 13% des
espèces
marines sont
connues

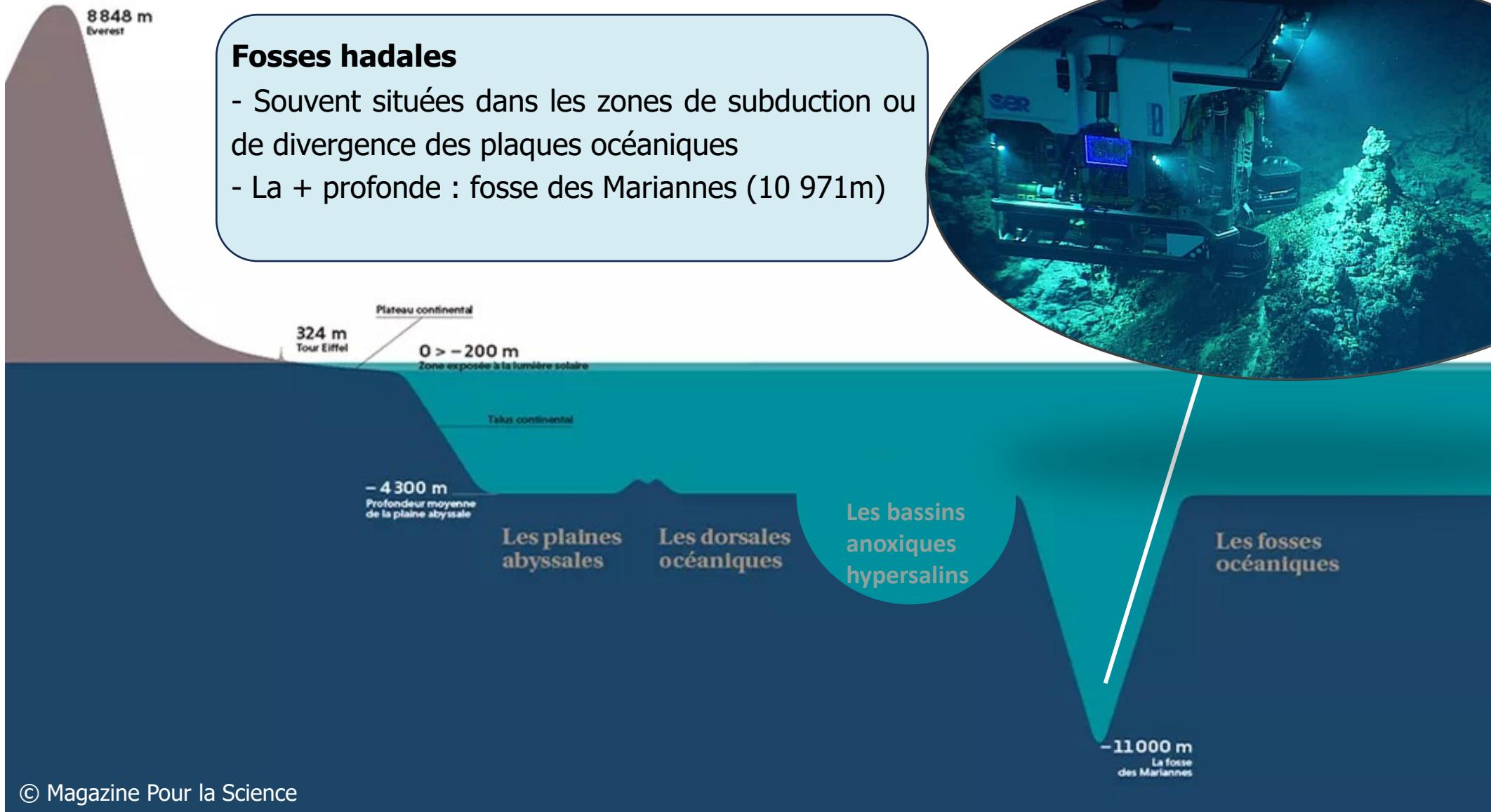
Seulement 1 à
3% des
espèces
microbiennes
sont connues

L'océan est un régulateur essentiel du climat...

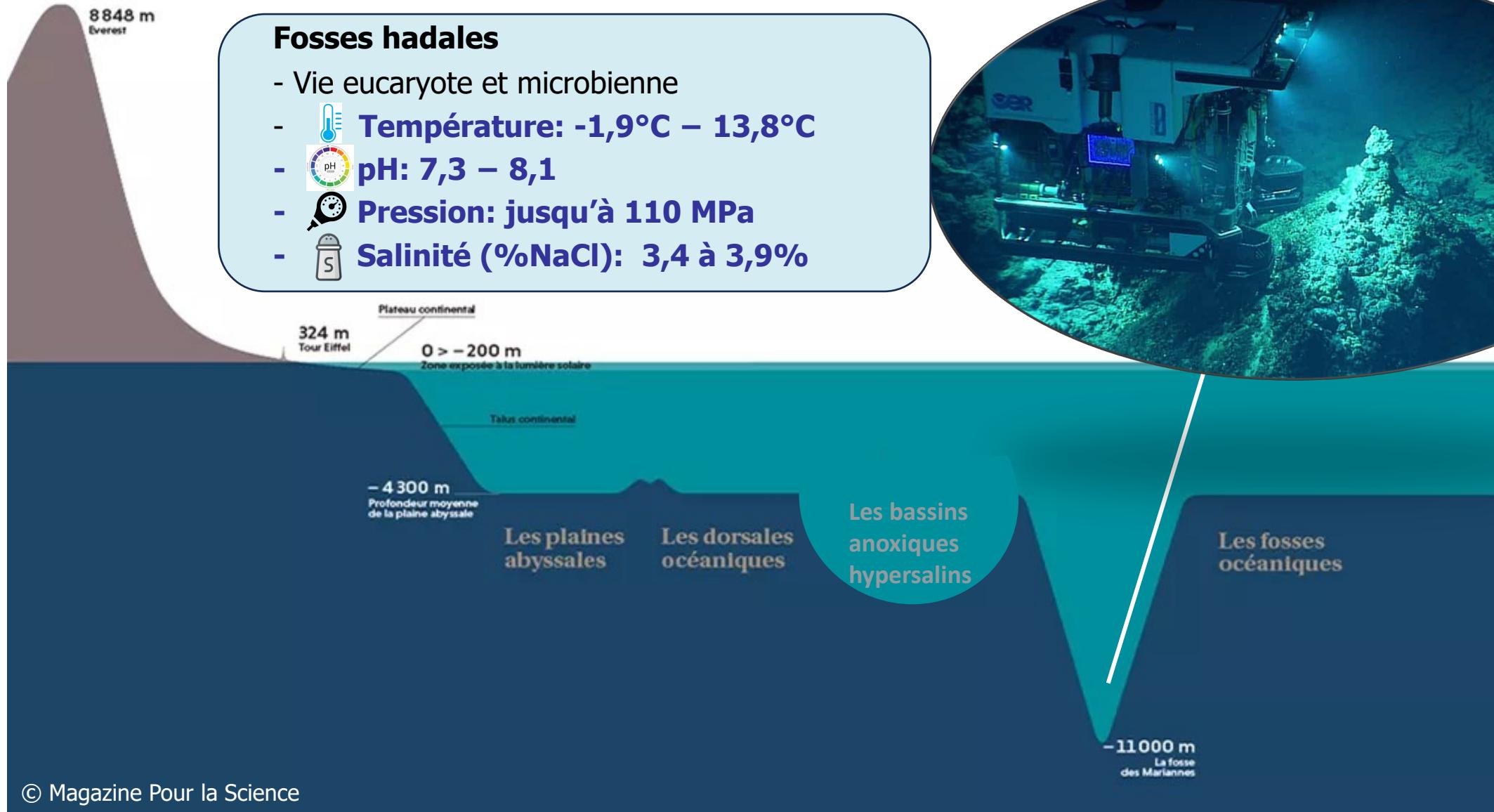
Des écosystèmes remarquables, y compris extrêmes, jusqu'au plus profond des océans



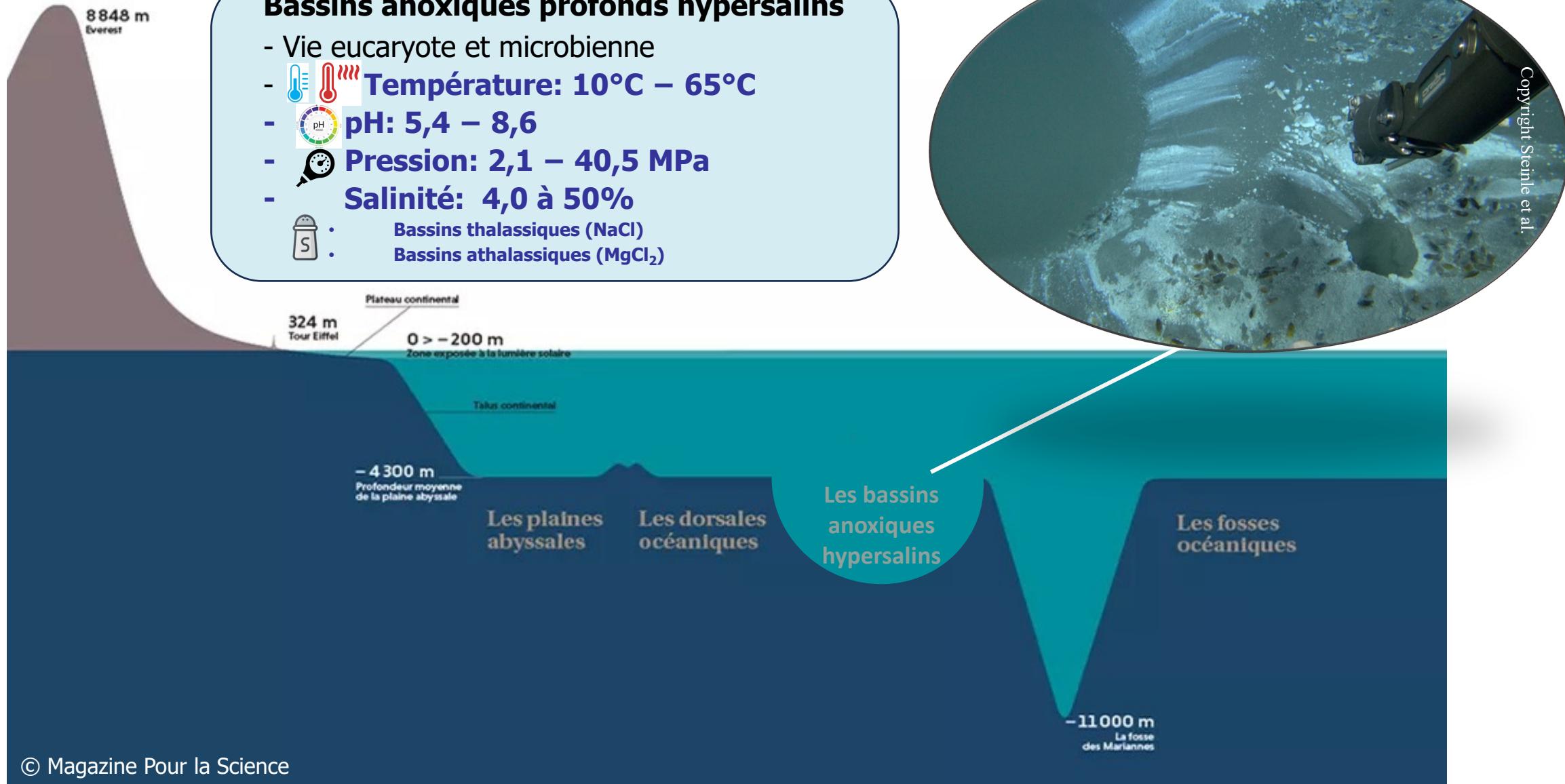
Des écosystèmes remarquables jusqu'au plus profond des océans



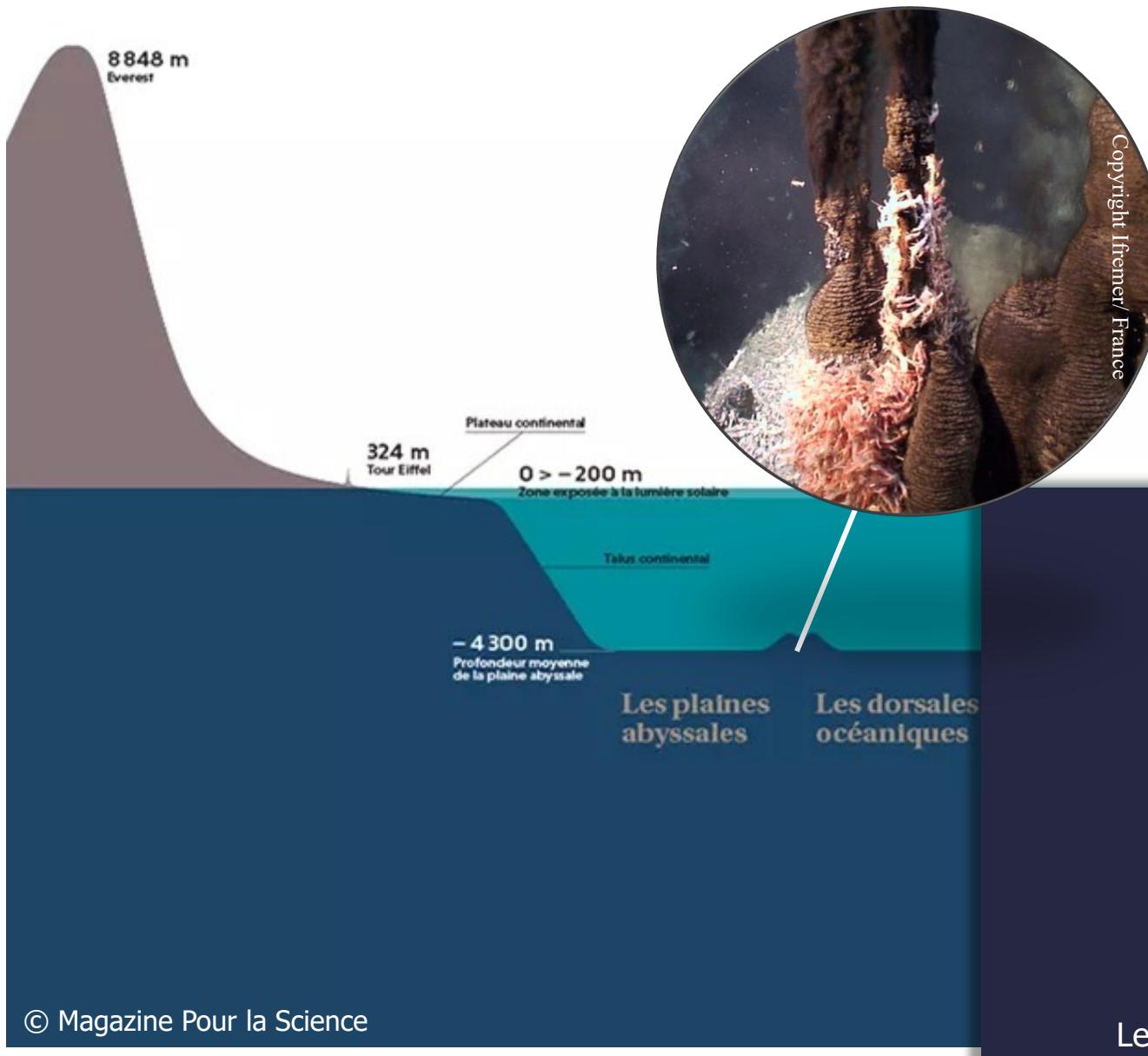
Des écosystèmes remarquables jusqu'au plus profond des océans



Des écosystèmes remarquables jusqu'au plus profond des océans

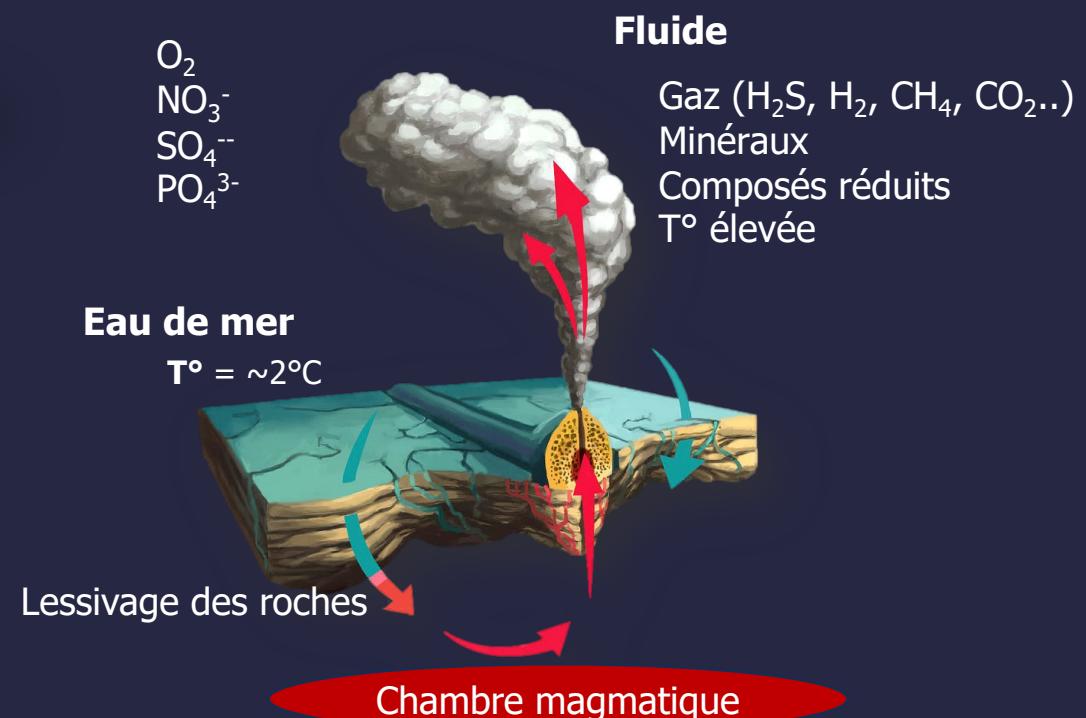


Des écosystèmes remarquables jusqu'au plus profond des océans

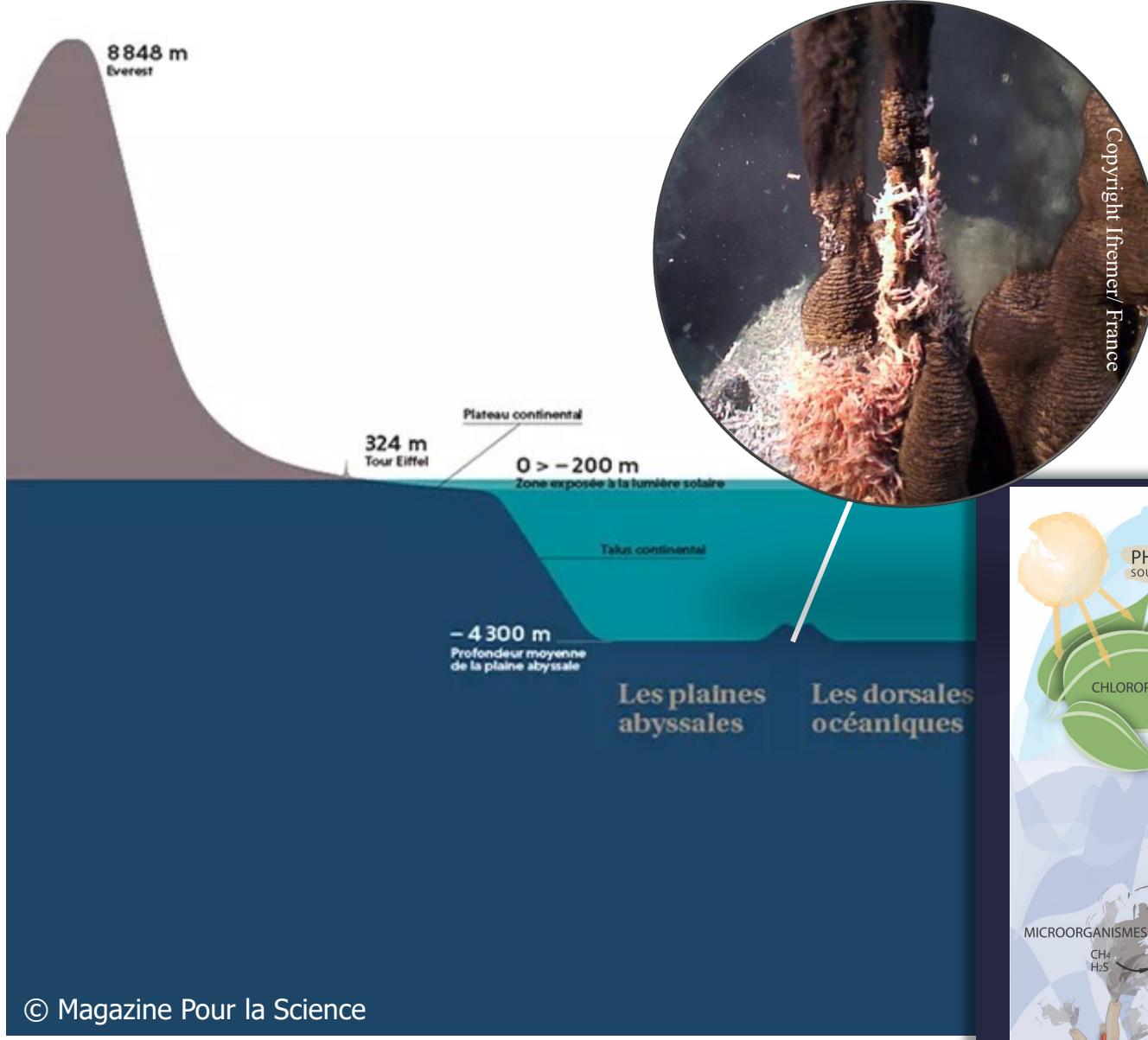


Sources hydrothermales profondes

- Principalement réparties le long des dorsales médio-océaniques

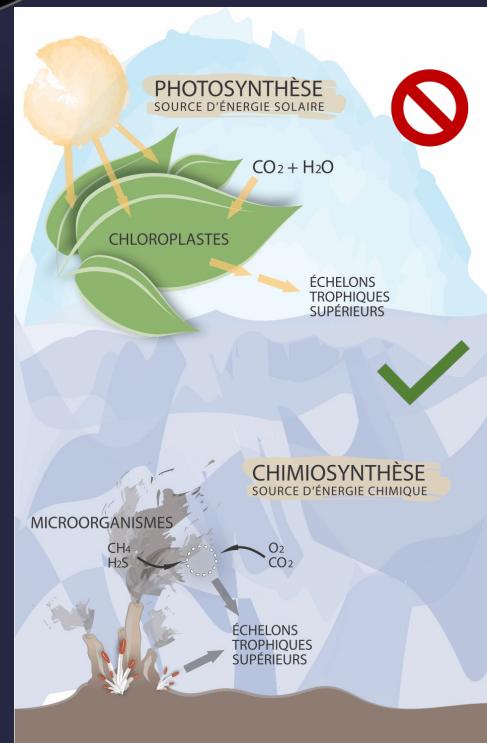


Des écosystèmes remarquables jusqu'au plus profond des océans

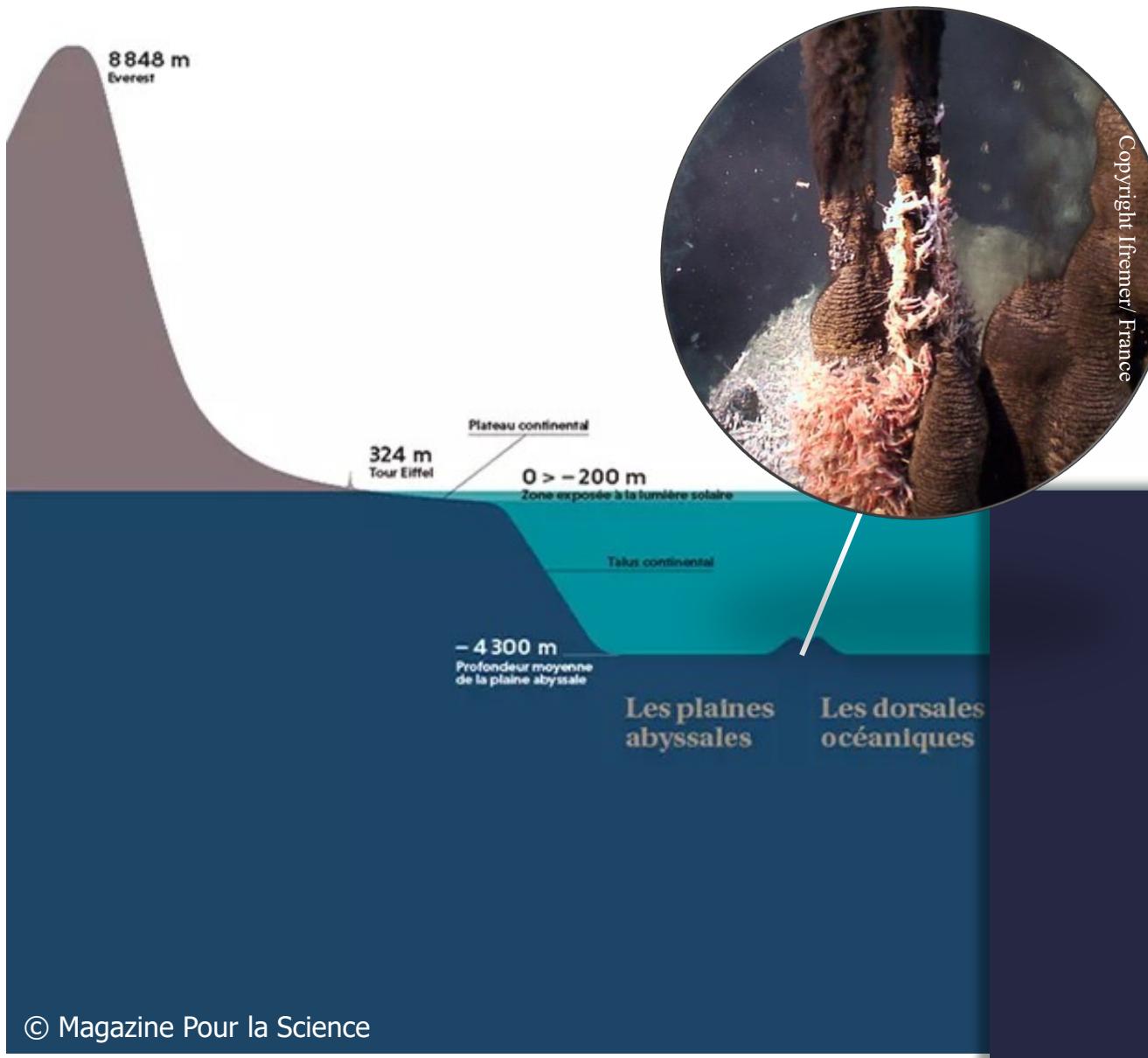


Sources hydrothermales profondes

- Oasis de vie
- Chimiosynthèse, obscurité, anoxie près du fluide
- Microorganismes à la base de la chaîne trophique
- Communautés animales et microbiennes luxuriantes

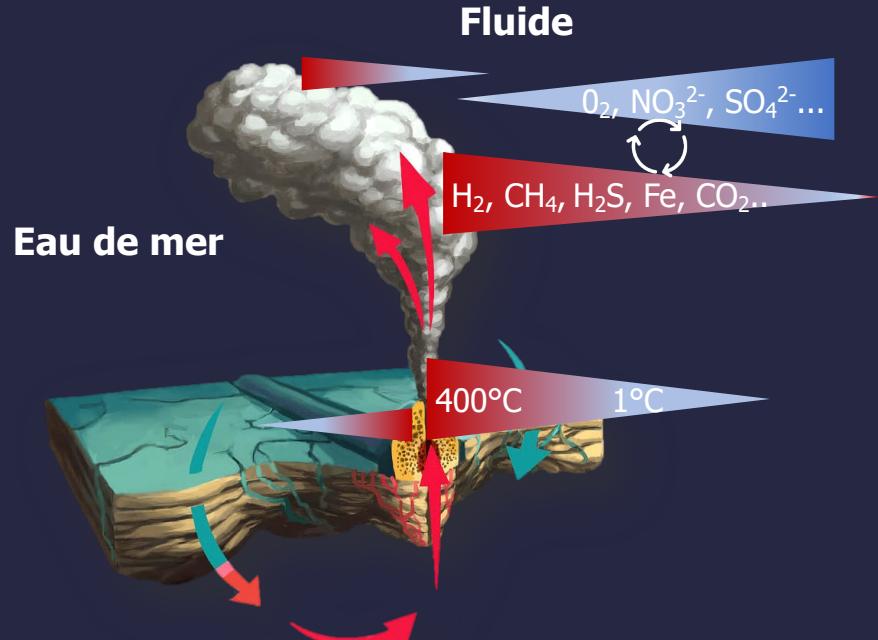


Des écosystèmes remarquables jusqu'au plus profond des océans



Sources hydrothermales profondes

- Forts gradients physico-chimiques (sur qqs cm)
- **Température: <1°C – jusqu'à 464°C**
- **pH: 3 – 11**
- **Pression: 2,1 à 50,7 MPa**
- **Salinité (%NaCl): 0,1 à 8%**
- **Radioactivité naturelle (²¹⁰Pb, ²¹⁰Po, ²²²Rn)**
- **Métaux lourds (Pb, Cd, Hg, Zn...)**



Les extrêmophiles et polyextrêmophiles

Extrêmophile: (micro-)organisme se développant de manière optimale dans une ou plusieurs conditions physiques ou chimiques extrêmes, hors norme (haute T°, P élevée, pH acide...), létales pour la plupart des organismes

➤ Définition anthropocentrée: les extrêmophiles **requièrent ces conditions extrêmes** pour réaliser leur cycle de vie

Les extrêmophiles et polyextrêmophiles

Extrêmophile: (micro-)organisme se développant de manière optimale dans une ou plusieurs conditions physiques ou chimiques extrêmes, hors norme (haute T°, P élevée, pH acide...), létales pour la plupart des organismes

➤ Définition anthropocentré: les extrêmophiles **requièrent ces conditions extrêmes** pour réaliser leur cycle de vie

TABLE 1 | Extremophiles nomenclature and ranges.

		Low → High ^a			
	pH	Hyperacidophile (<pH 3)	Acidophile (<pH 5)	Neutrophile (pH 5–9)	Alkaliphile (>pH 9)
	Temperature		Psychrophile (<20°C)	Mesophile (20–45°C)	Thermophile (45–80°C)
	Salinity ^b		Non-halophile (<1.2%)	Halotolerant (1.2–2.9%; tolerate ≤ 14.6%)	Halophile (>8.8%)
	Pressure			Piezotolerant or barotolerant (0.1–10 MPa)	Piezophile or barophile (10–50 MPa)
	Water activity			Xerophile ($a_w < 0.7$)	Hyperxerophile or hyperaridophile
	Polyextremophile			Tolerance or preference for multiple parameters combined	

^aThe distinction between an extremotolerant microbe and an extremophile is based on the location of the optimum along the specific parameter range. See main text for discussion. ^bSalinity expressed as percent of NaCl (w/v). Specific resistance to more chaotropic salts has been tested for some strains, for instance in the presence of $MgCl_2$.

Les extrêmophiles et polyextrêmophiles

Extrêmophile: (micro-)organisme se développant de manière optimale dans une ou plusieurs conditions physiques ou chimiques extrêmes, hors norme (haute T°, P élevée, pH acide...), létales pour la plupart des organismes

➤ Définition anthropocentré: les extrêmophiles **requièrent ces conditions extrêmes** pour réaliser leur cycle de vie

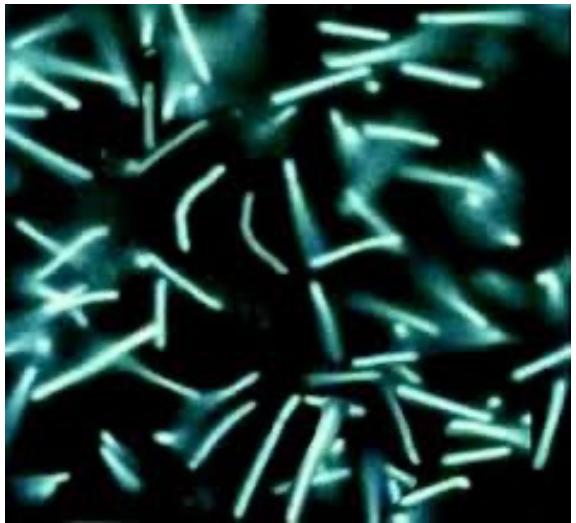
TABLE 1 | Extremophiles nomenclature and ranges.

		Low → High ^a			
	pH	Hyperacidophile (<pH 3)	Acidophile (<pH 5)	Neutrophile (pH 5–9)	Alkaliphile (>pH 9)
	Temperature		Psychrophile (<20°C)	Mesophile (20–45°C)	Thermophile (45–80°C)
	Salinity ^b		Non-halophile (<1.2%)	Halotolerant (1.2–2.9%; tolerate ≤ 14.6%)	Halophile (>8.8%)
	Pressure			Piezotolerant or barotolerant (0.1–10 MPa)	Piezophile or barophile (10–50 MPa)
	Water activity			Xerophile ($a_w < 0.7$)	Hyperxerophile or hyperaridophile (>0.7)
	Polyextremophile			Tolerance or preference for multiple parameters combined	

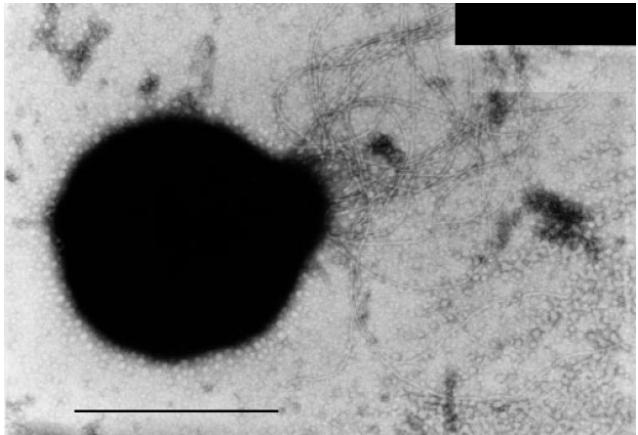
^aThe distinction between an extremotolerant microbe and an extremophile is based on the location of the optimum along the specific parameter range. See main text for discussion. ^bSalinity expressed as percent of NaCl (w/v). Specific resistance to more chaotropic salts has been tested for some strains, for instance in the presence of $MgCl_2$.

Polyextrêmophile: qualifie un organismes vivant qui nécessite ou supporte plusieurs types de conditions extrêmes

Exemples de polyextrêmophiles



Copyright K.O. Stetter, R. Huber and R. Rachel, University of Regensburg, Germany



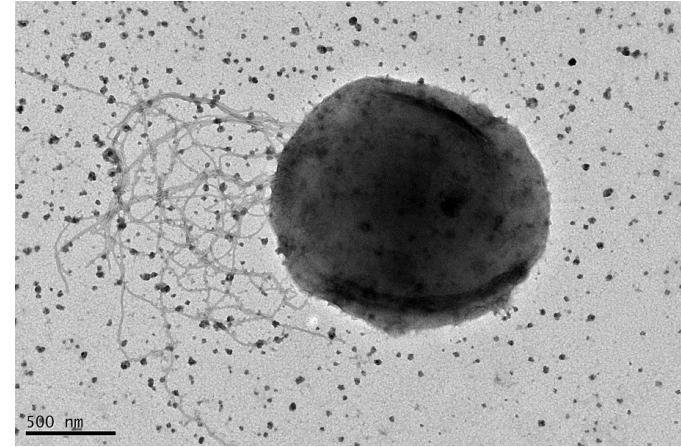
Copyright Jolivet et al., France

Record de vie à haute température

- Archée *Methanopyrus kandleri*
 -  84 - 116°C
 -  ⇒ 122 °C sous pression ! (20 MPa)



Copyright C.Dalmasso, K. Alain, France



Record de radiorésistance

- Archée *Thermococcus gammatolerans*
 -  Peut résister à une irradiation (dose absorbée) de 30 kGy et supporter une dose instantanée de 5 kGy sans perte de viabilité (= dose létale pour l'homme)

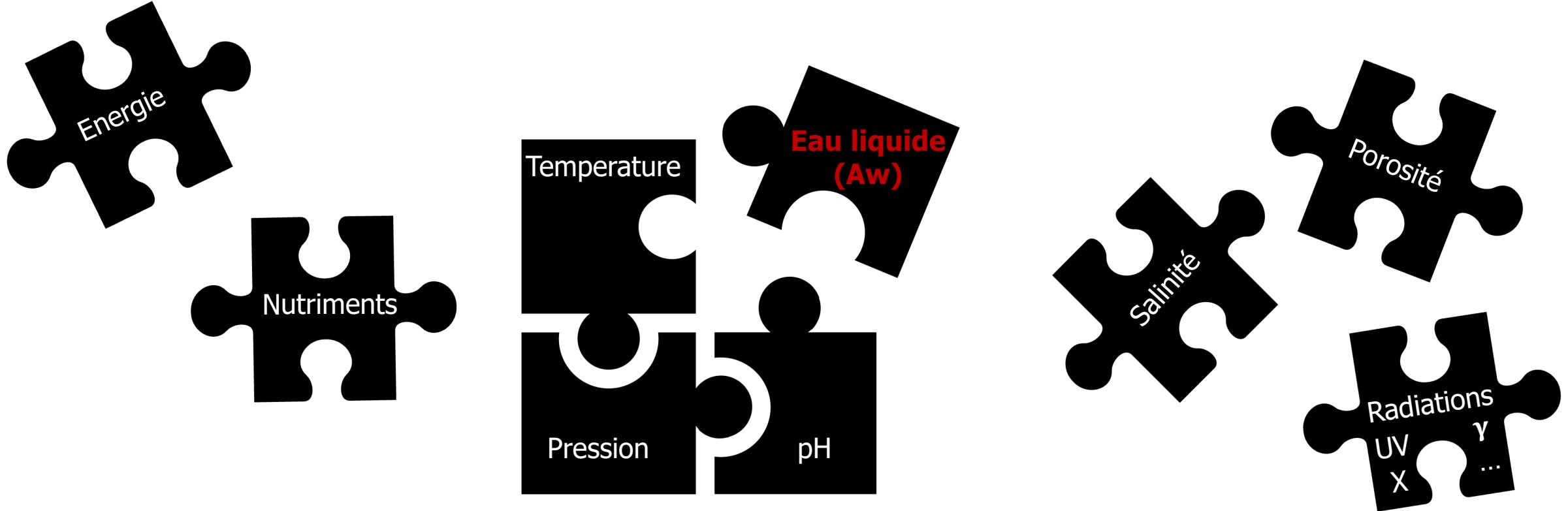
-  55 - 95°C

Record de vie sous pression

- Archée *Thermococcus piezophilus*
 - 5000 m de profondeur
 -  0,1 - 125 MPa (75°C)
 -  60 - 95°C

Les limites physico-chimiques de la vie

Les limites d'**habitabilité** sont fixées par diverses propriétés physiques, mécaniques et chimiques telles que.....



... qui agissent à la fois individuellement et conjointement

Ces limites ne sont pas toutes identifiées

Quelques records de Vie sur Terre

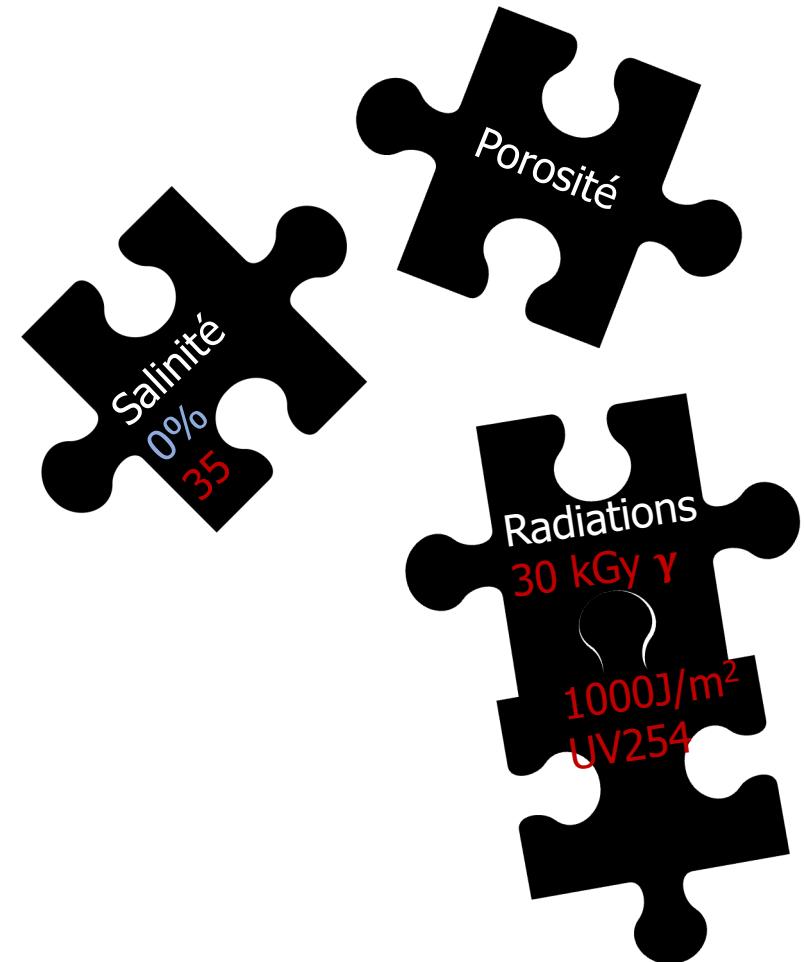
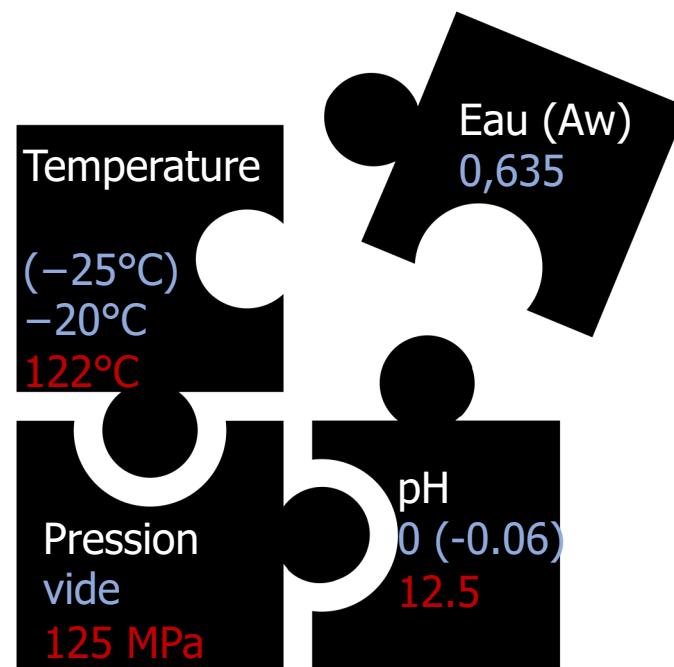
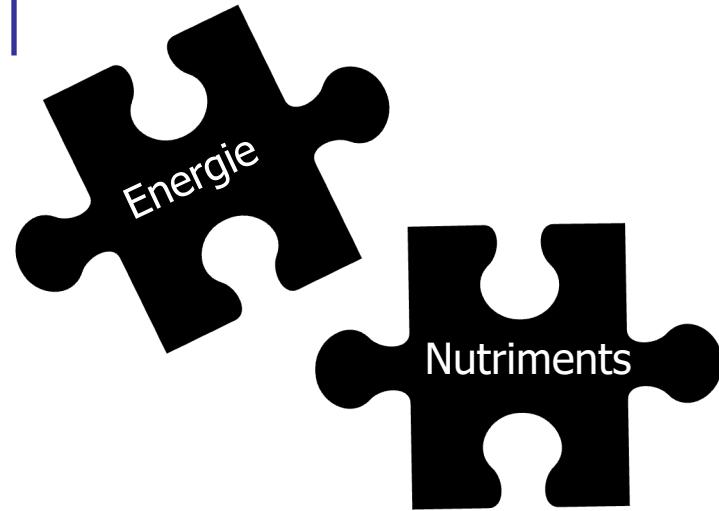


TABLE 3 | Limits of life as identified by (poly)extremophilic organisms in pure cultures.

Strain	Domain	Extremophile Type	Isolation ecosystem	Temperature (°C)	pH	Pressure (Mpa)	Salinity (%)	Water activity (α_w)	References
<i>Picrophilus oshimae</i> KAW 2/2	Archaea	Hyperacidophile	Hot springs, Solfataras	47–65 (60) ^a	–0.06 –1.8 (0.7)	nr	0–20	nr	Schleper et al., 1995, 1996
<i>Serpentinomonas</i> sp. B1	Bacteria	Alkaliphile	Serpentinizing system (water)	18–37 (30)	9 –12.5 (11)	nr	0–0.5 (0)	nr	Suzuki et al., 2014
<i>Methanopyrus kandleri</i> 116	Archaea	Hyperthermophile	Deep-sea hydrothermal vent	90– 122 (105)	(6.3–6.6)	0.4–40	0.5–4.5 (3.0)	nr	Takai et al., 2008
<i>Planococcus halocryophilus</i> Or1	Bacteria	Halopsychrophile	Sea ice core	–15–37 (25)	6–11 (7–8)	nr	0–19 (2)	nr	Mykytczuk et al., 2012, 2013
<i>Halarsenatibacter silvermanii</i> SLAS-1	Bacteria	Haloalkaliphile	Soda lake	28–55 (44)	8.7–9.8 (9.4)	nr	20–35 (35)	nr	Oremland et al., 2005
<i>Thermococcus piezophilus</i> CDGS	Archaea	Piezothermophile	Deep-sea hydrothermal vent	60–95 (75)	5.5–9 (6)	0.1– 125 (50)	2–6 (3)	nr	Dalmasso et al., 2016
Haloarchaeal strains GN-2 and GN-5	Archaea	Xerophile	Solar salterns (brine)	nr	nr	nr	nr	0.635	Javor, 1984

^aData presented as range (optimum) for each parameter. nr, not reported in the original publication. Current limits are highlighted in bold.

➤ Les extrémophiles nous aident à comprendre les limites de la vie

Comment vivre dans des conditions extrêmes

Molécules biologiques = objets dynamiques

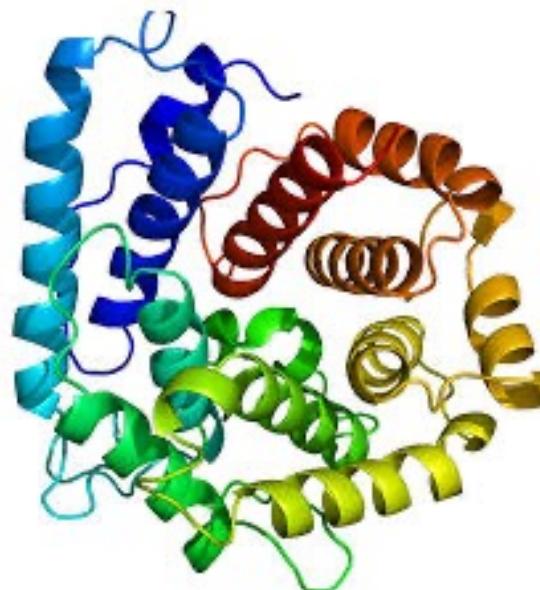
Impératifs:

- Maintenir la stabilité des liaisons chimiques des molécules (liaison peptidique, liaison hydrogène)
- Maintenir une conformation précise des protéines et suffisamment de flexibilité

Repliement 3D précis

Flexibilité

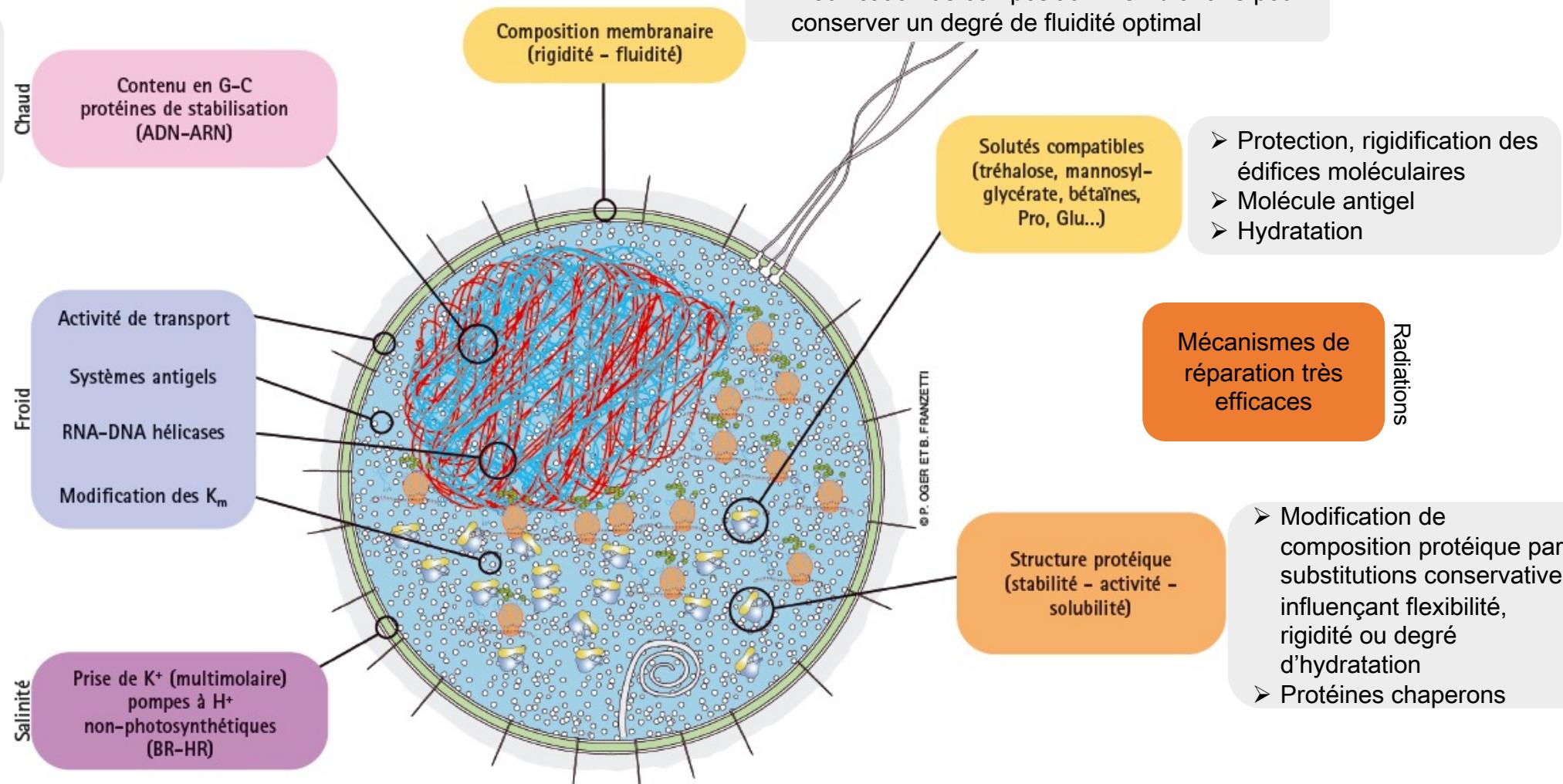
Hydratation



Comment vivre dans des conditions extrêmes

Des stratégies communes à plusieurs contraintes physico-chimiques

➤ ADN et ARN:
Stabilisation par
modifications de
composition ou
synthèse de molécules
stabilisatrices



Pour préserver le génome et le protéome et contrer les effets délétères des habitats

Modifié de Oger and Franzetti, (2012)

Conclusions

- **Les limites de la vie sur Terre ne sont pas toutes connues**

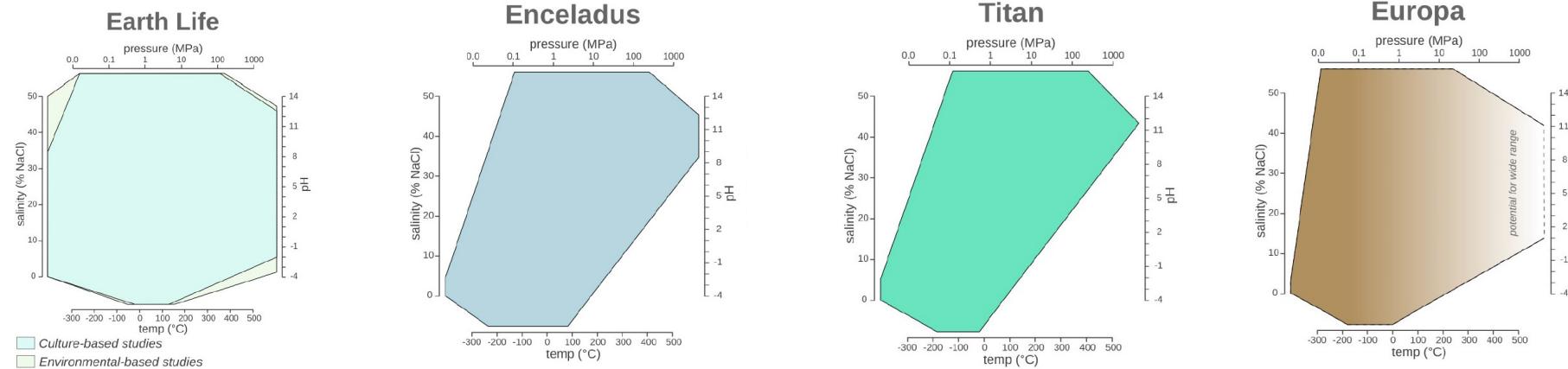
La vie n'a pas été détectée à:

- $T^\circ > 122^\circ\text{C}$ (N.B. : les considérations thermodynamiques concernant la stabilité des macromolécules prédisent que la vie pourrait être possible entre -40°C et $135/150^\circ\text{C}$)
- $\text{pH} > 12,5$
- Dans les habitats sans eau à l'état liquide
- Dans les habitats polyextrêmes les plus hostiles (ex. certains lacs de la région géothermique de Dallol: salinité 20-78%, faible Aw, combinée à $\text{pH} 1$ à 3)

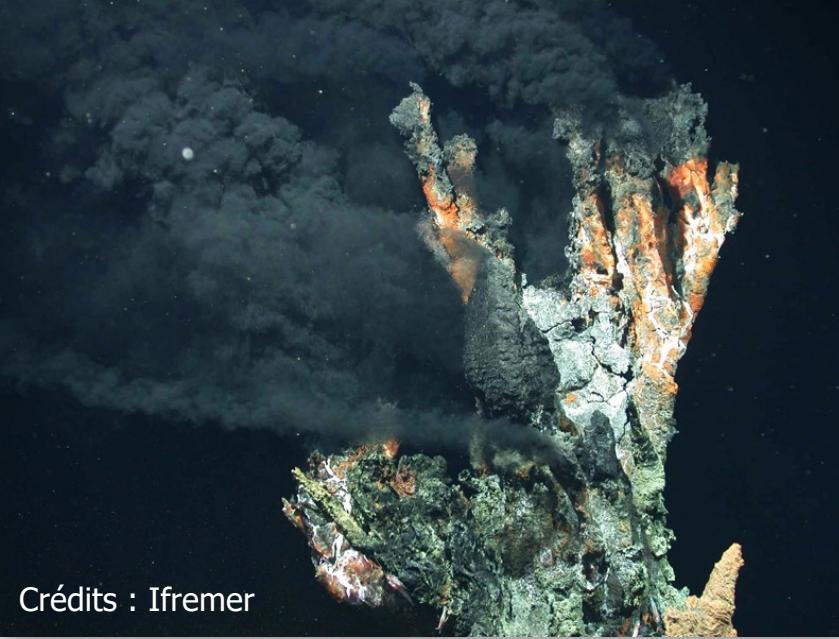
- **Les (poly)extrêmophiles nous aident à comprendre les limites de la vie....**

- **.... et pourraient nous aider à déterminer quels océans souterrains sur les lunes glacées pourraient être habitables, étant donné que la présence d'eau à l'état liquide semble essentielle à la vie**

Ex. Océans souterrains sur les lunes glacées : Europe, Encelade, Ganymède, Titan ou les océans les (exo-) planètes « océan » comme LHS1140b

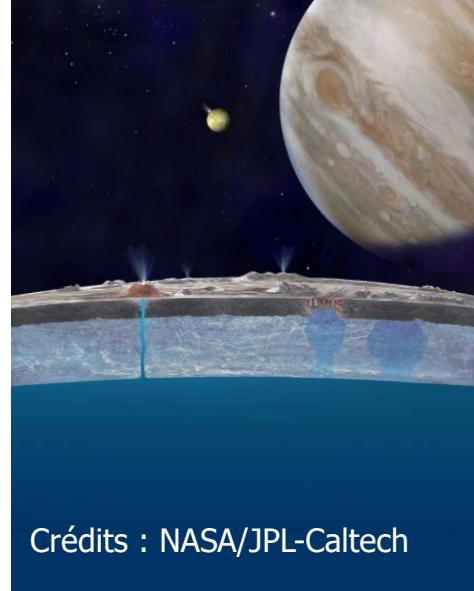


Projection des limites physico-chimiques de la vie sur Terre en termes de T° , P, pH et salinité sur d'autres corps planétaires



Crédits : Ifremer

Merci de votre attention



Crédits : NASA/JPL-Caltech

Sources de financements

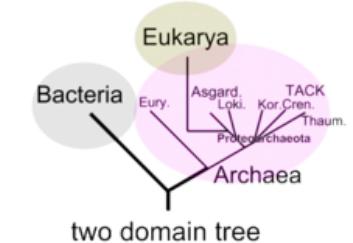
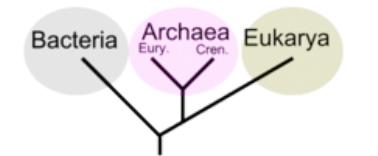


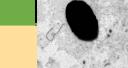
Crédits : Ron Miller



Crédits : NASA/JPL-Caltech

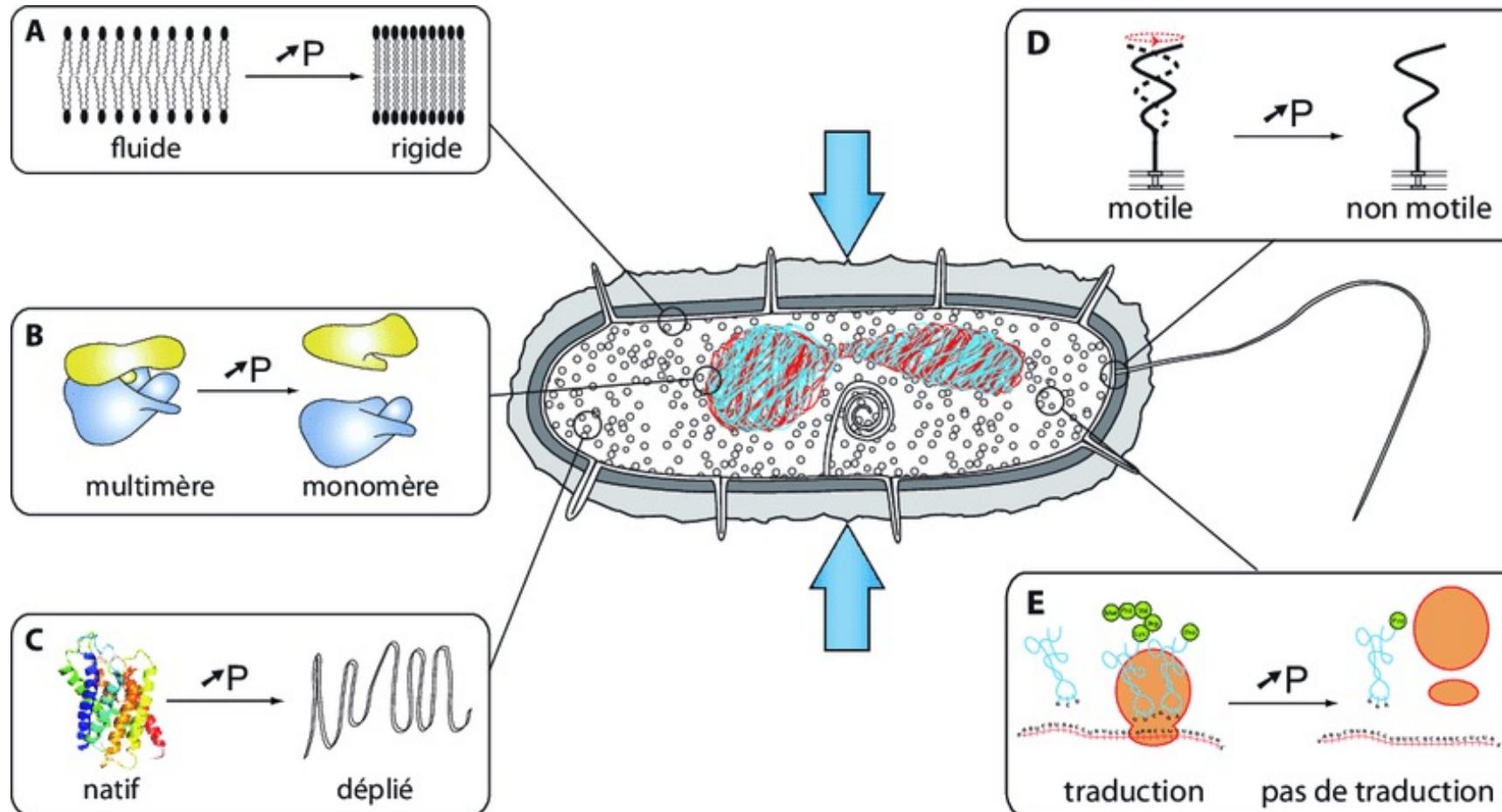
Les Archées



	Bactéries	Archées	Eucaryotes
Morphologie, taille	 Petite (1-10 μm)	 Petite (1-10 μm)	 > 10 μm
Compartiments intracellulaires	Non Pas de vrai noyau (nucleoide)		Oui Noyau
Gestion de l'énergie	Membrane		Organites dans la cellule (mitochondries)
ADN	Généralement circulaire (chromosome unique le + souvent)		Molécules linéaires générallement (chromosomes)
Division	Division simple		Multiplication conforme de la cellule (mitose)
Machinerie cellulaire de recopie ADN, de traduction de protéines...		Transcription, traduction, réplication, réparation...	
Voies métaboliques		Voies uniques (méthanogenèse...)	
Autres		Lipides de la membrane plasmique...	

Comment vivre dans des conditions extrêmes

Exemple des effets des hautes pressions hydrostatiques sur la cellules et les composés cellulaires



Des écosystèmes remarquables jusqu'au plus profond des océans

