



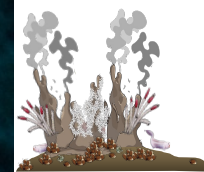
# La vie dans des environnements océaniques extrêmes

**ALAIN Karine**

[Karine.Alain@univ-brest.fr](mailto:Karine.Alain@univ-brest.fr)

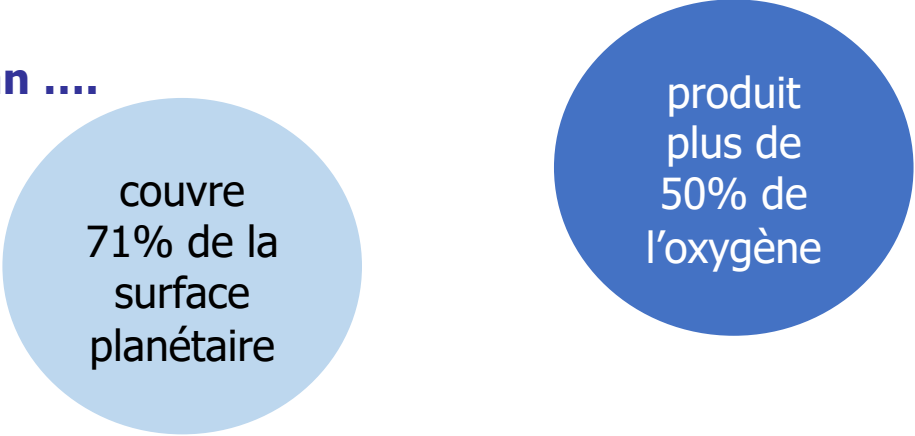
Directrice de Recherche au CNRS - Microbiologiste  
EMR 6002-BIOMEX/BEEP, CNRS-UBO-Ifremer  
Biologie Interactions et adaptations des organismes en  
Milieu EXtrême  
Brest-Plouzané, FRANCE

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 CO<sub>2</sub> 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

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

absorbe ~30% du CO<sub>2</sub> 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  
km<sup>3</sup>

abrite entre  
50 et 82%  
des formes  
de vie  
terrestre

héberge  
environ 2.2  
millions  
d'espèces

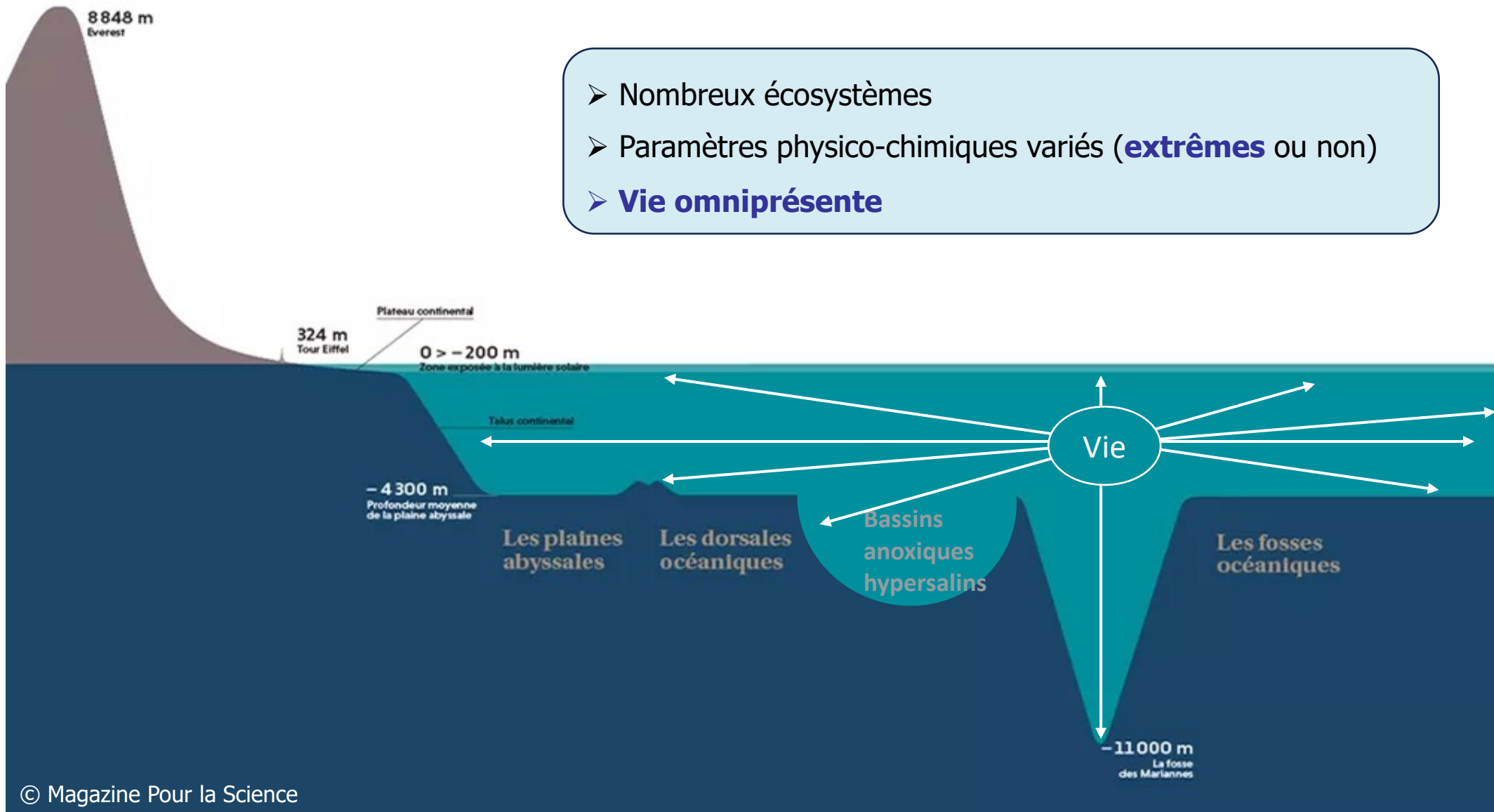
Seulement  
~ 13% des  
espèces  
marines sont  
connues

Seulement 1 à  
3% des  
espèces  
microbiennes  
sont connues



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

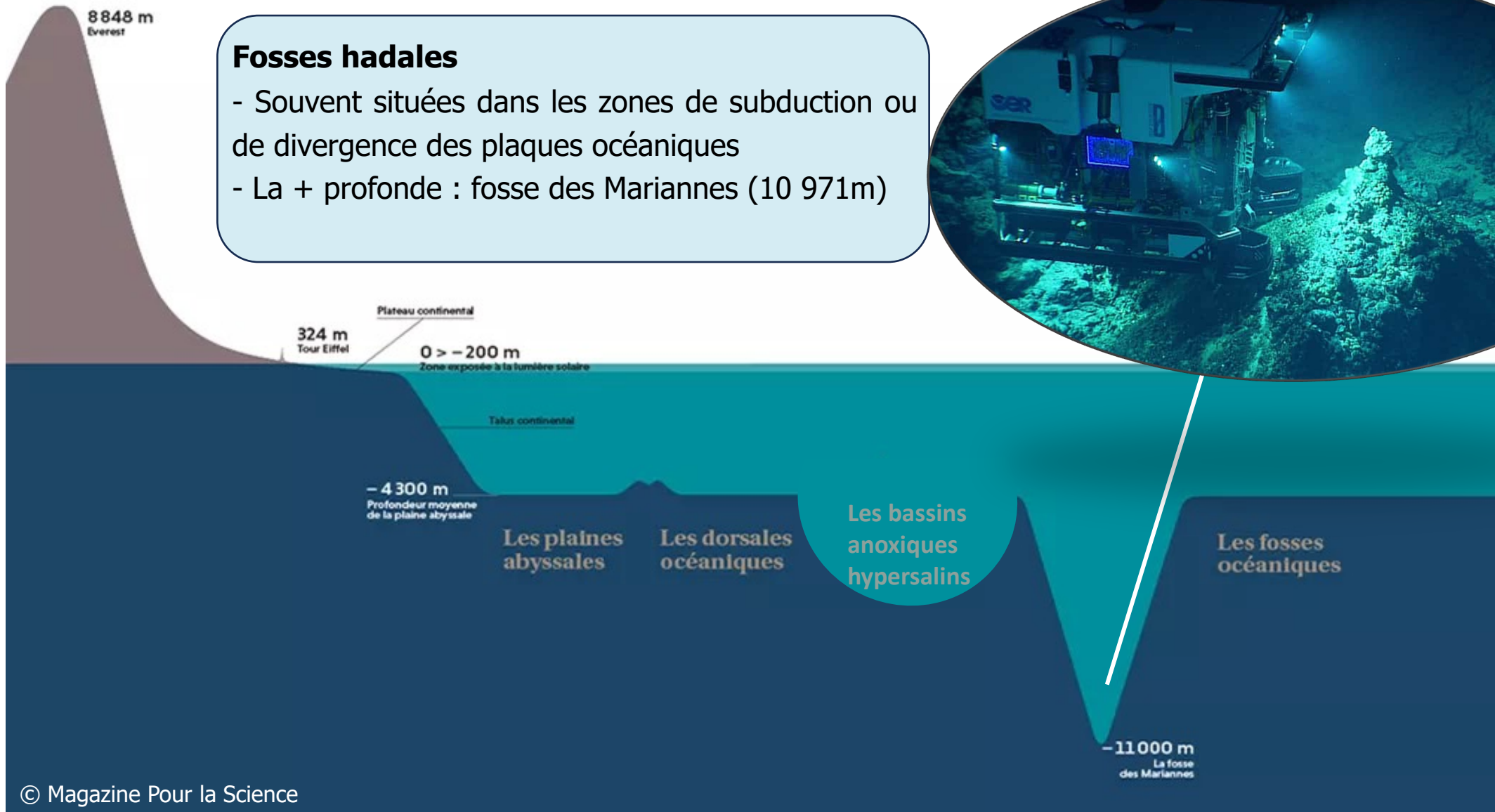
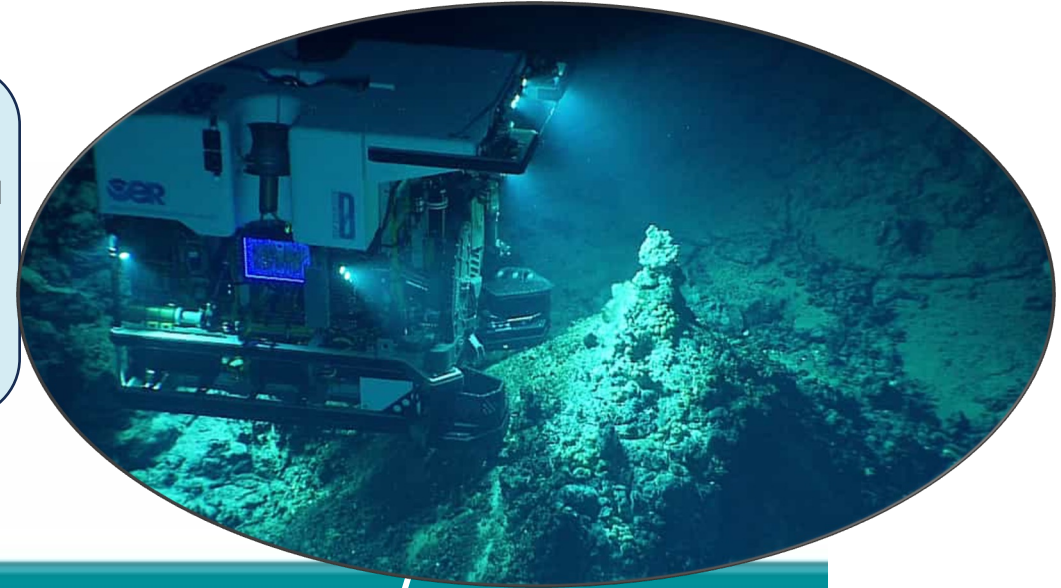
- Nombreux écosystèmes
- Paramètres physico-chimiques variés (**extrêmes** ou non)
- **Vie omniprésente**



# Des écosystèmes remarquables jusqu'au plus profond des océans

## Fosses hadales





- Souvent situées dans les zones de subduction ou de divergence des plaques océaniques
- La + profonde : fosse des Mariannes (10 971m)

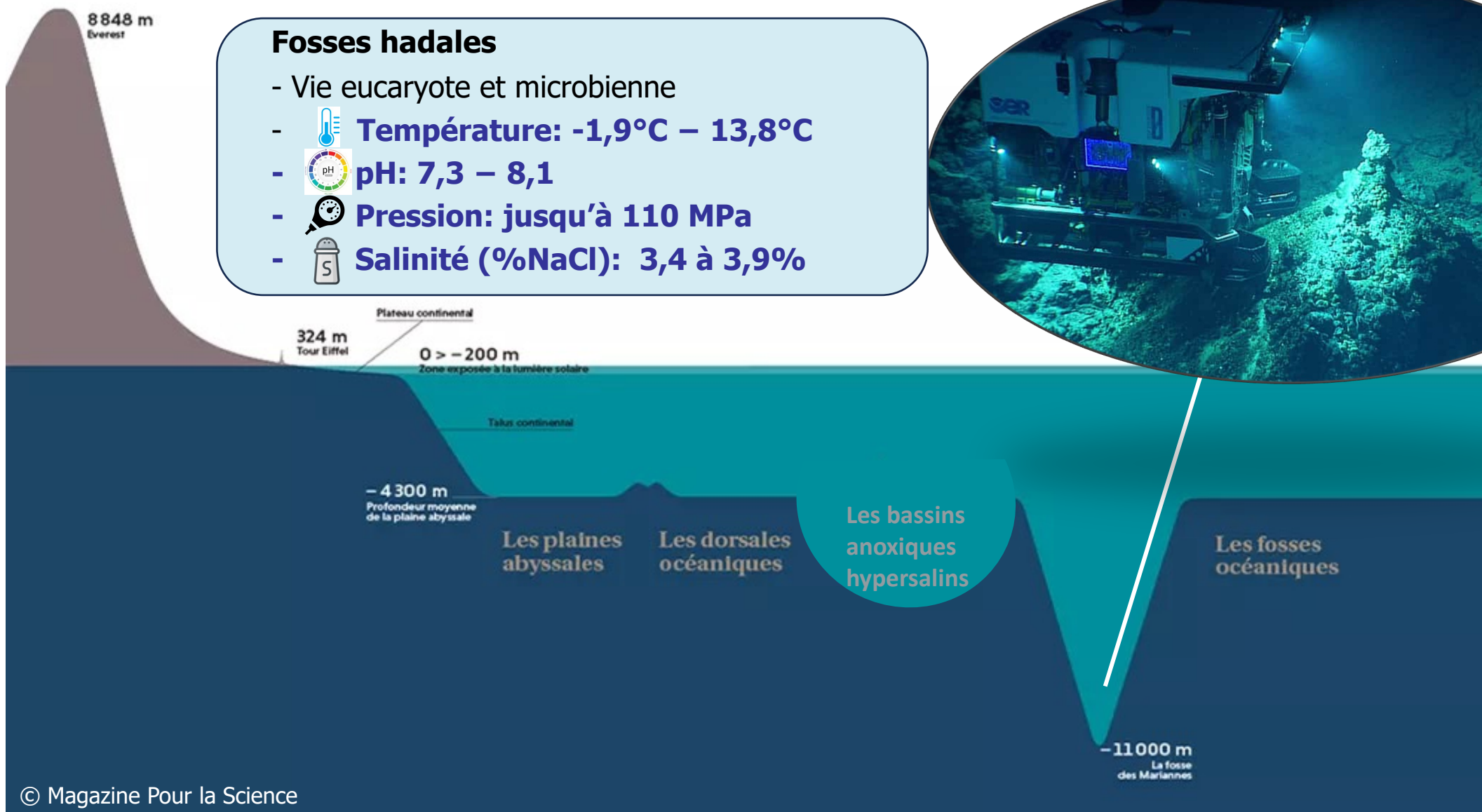


© Magazine Pour la Science

# Des écosystèmes remarquables jusqu'au plus profond des océans

## Fosses hadales







- Vie eucaryote et microbienne
-  **Température:  $-1,9^{\circ}\text{C}$  –  $13,8^{\circ}\text{C}$**
-  **pH: 7,3 – 8,1**
-  **Pression: jusqu'à 110 MPa**
-  **Salinité (%NaCl): 3,4 à 3,9%**



© Magazine Pour la Science

# Des écosystèmes remarquables jusqu'au plus profond des océans

## Bassins anoxiques profonds hypersalins

- Vie eucaryote et microbienne
-   **Température: 10°C – 65°C**
-  **pH: 5,4 – 8,6**
-  **Pression: 2,1 – 40,5 MPa**
- **Salinité: 4,0 à 50%**
  -  Bassins thalassiques (NaCl)
  -  Bassins athalassiques (MgCl<sub>2</sub>)

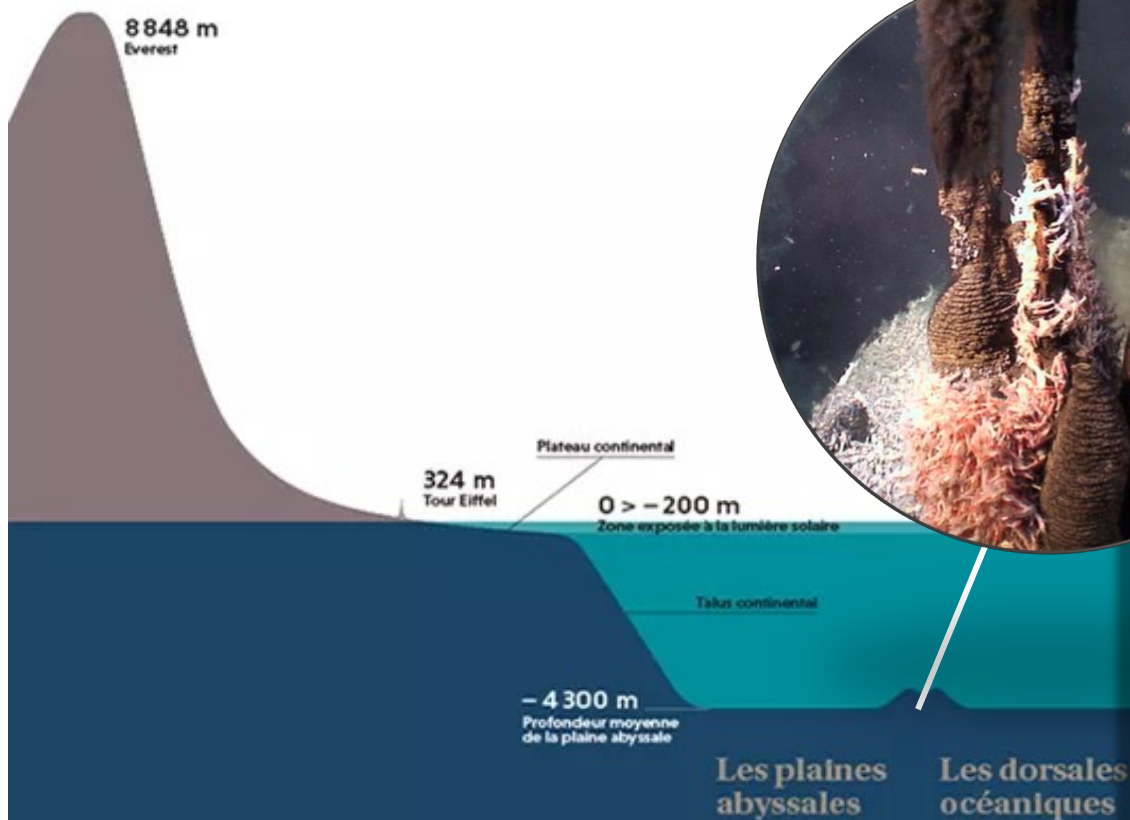




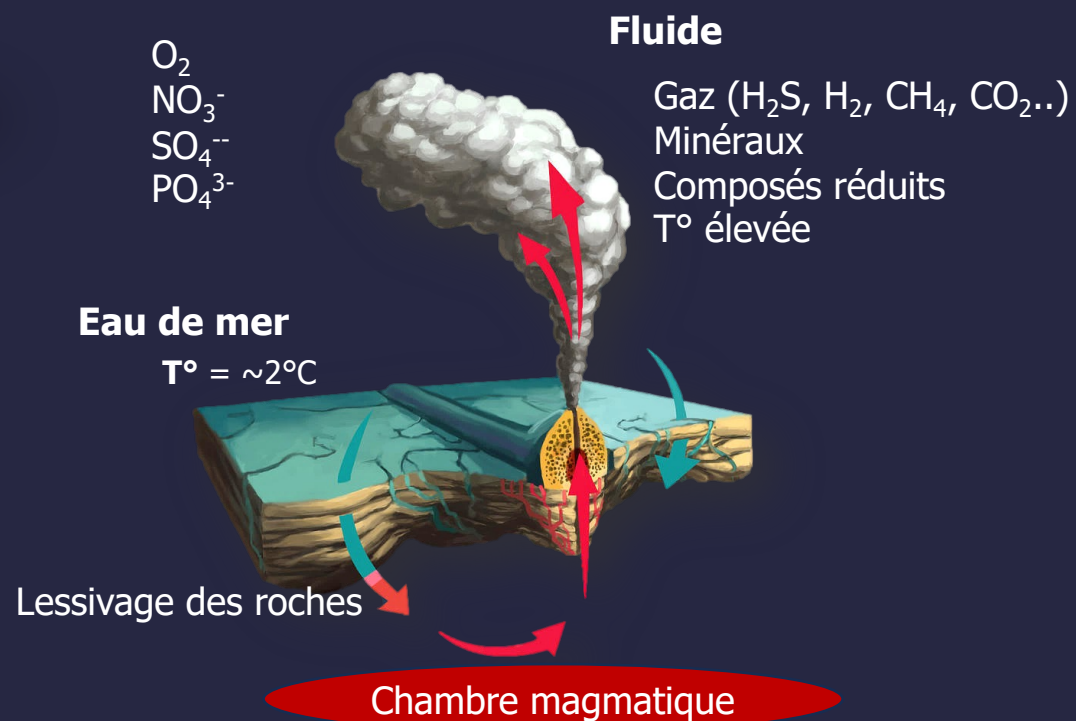
# Des écosystèmes remarquables jusqu'au plus profond des océans

## Sources hydrothermales profondes

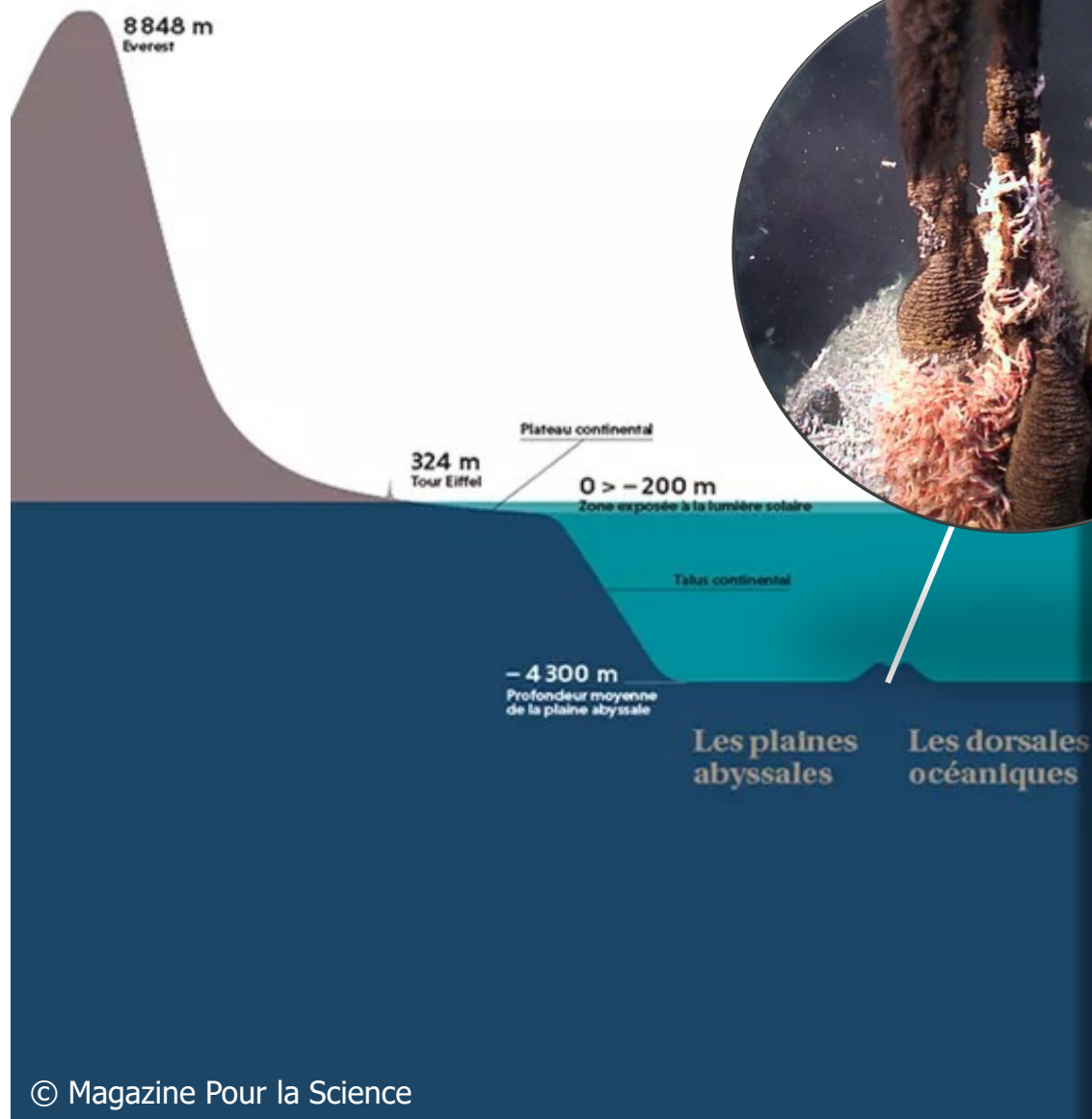
- Principalement réparties le long des dorsales médio-océaniques



© Magazine Pour la Science

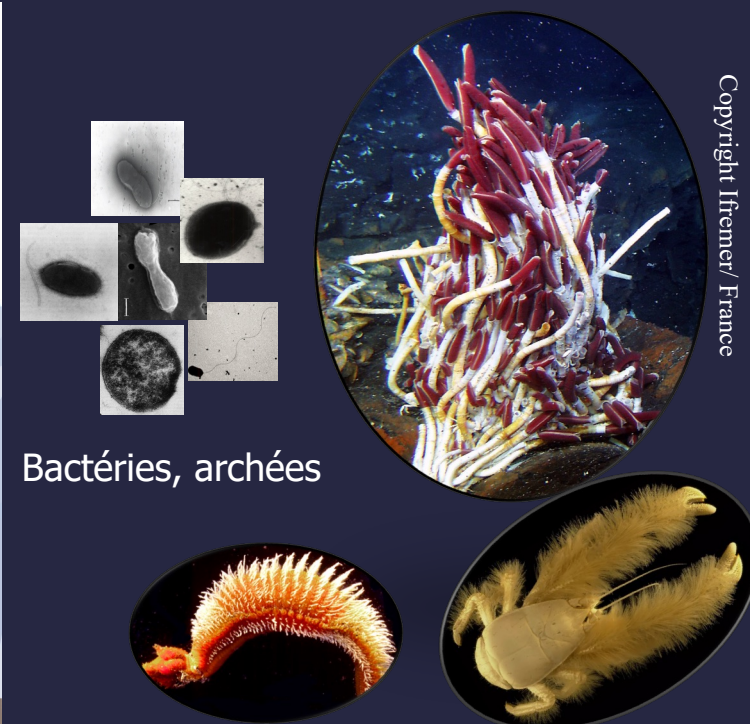
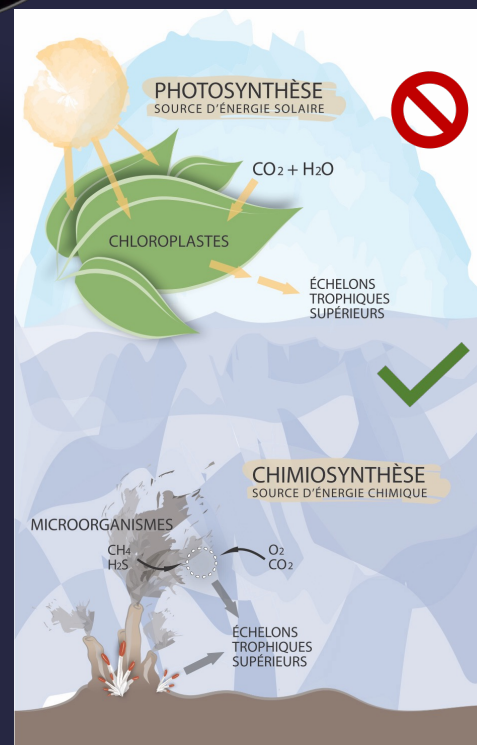


# Des écosystèmes remarquables jusqu'au plus profond des océans

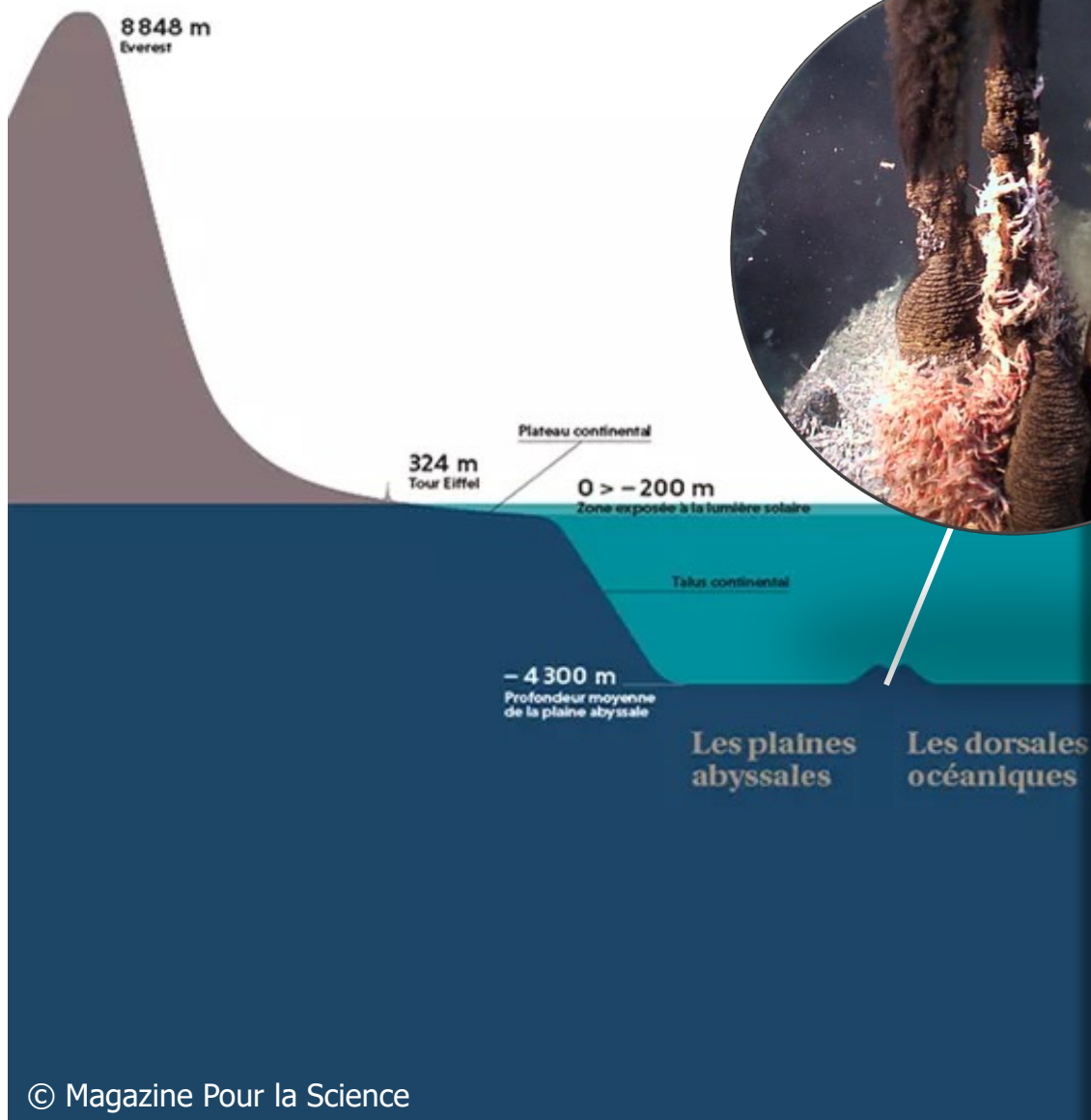


## Sources hydrothermales profondes







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

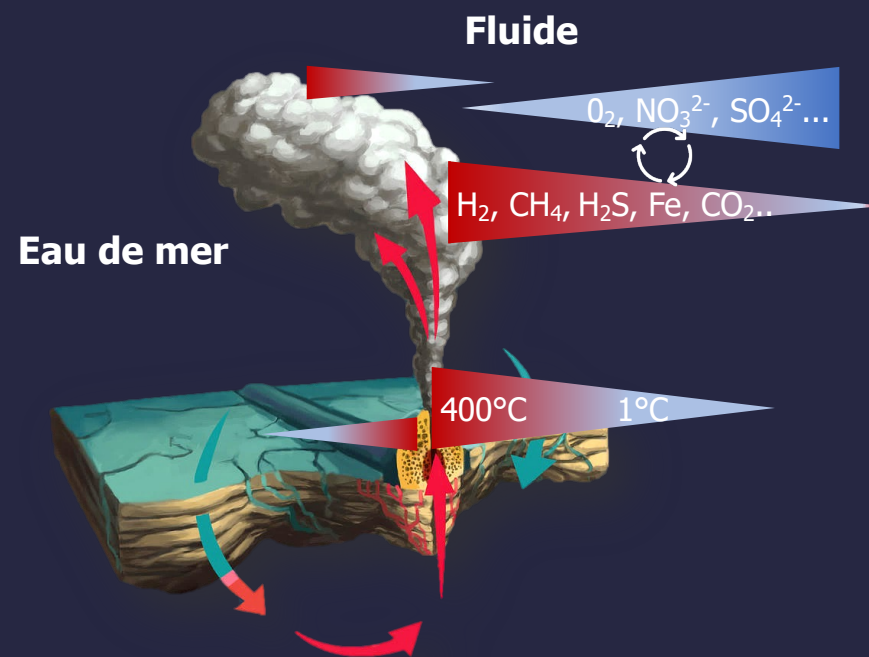


# Des écosystèmes remarquables jusqu'au plus profond des océans



## 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 ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ )**
-  **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 anthropocentrée : les extrêmophiles **requièrent ces conditions extrêmes** pour réaliser leur cycle de vie

**TABLE 1** | Extremophiles nomenclature and ranges.

Low → High <sup>a</sup>						
	pH	Hyperacidophile ( $< \text{pH } 3$ )	Acidophile ( $< \text{pH } 5$ )	Neutrophile ( $\text{pH } 5\text{--}9$ )	Alkaliphile ( $> \text{pH } 9$ )	Hyperalkaliphile ( $> \text{pH } 11$ )
	Temperature		Psychrophile ( $< 20^{\circ}\text{C}$ )	Mesophile ( $20\text{--}45^{\circ}\text{C}$ )	Thermophile ( $45\text{--}80^{\circ}\text{C}$ )	Hyperthermophile ( $> 80^{\circ}\text{C}$ )
	Salinity <sup>b</sup>		Non-halophile ( $< 1.2\%$ )	Halotolerant ( $1.2\text{--}2.9\%$ ; tolerate $\leq 14.6\%$ )	Halophile ( $> 8.8\%$ )	Extreme halophile ( $> 14.6\%$ , cannot grow $< 8.8\%$ )
	Pressure			Piezotolerant or barotolerant ( $0.1\text{--}10 \text{ MPa}$ )	Piezophile or barophile ( $10\text{--}50 \text{ MPa}$ )	Hyperpiezophile or hyperbarophile ( $> 50 \text{ MPa}$ )
	Water activity			Xerophile ( $a_w < 0.7$ )		
	Polyextremophile			Tolerance or preference for multiple parameters combined		
<sup>a</sup> The distinction between an extremotolerant microbe and an extremophile is based on the location of the optimum along the specific parameter range. See main text						






<sup>a</sup>The 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. <sup>b</sup>Salinity 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<sub>2</sub>.

# 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

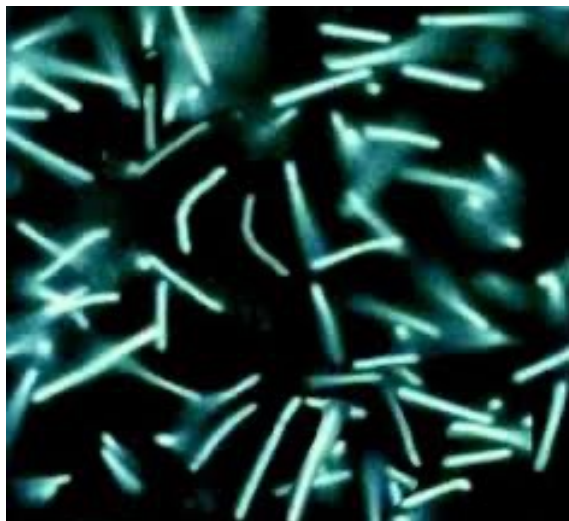
TABLE 1 | Extremophiles nomenclature and ranges.

Low → High <sup>a</sup>						
	pH	Hyperacidophile ( $< \text{pH } 3$ )	Acidophile ( $< \text{pH } 5$ )	Neutrophile ( $\text{pH } 5\text{--}9$ )	Alkaliphile ( $> \text{pH } 9$ )	Hyperalkaliphile ( $> \text{pH } 11$ )
	Temperature		Psychrophile ( $< 20^{\circ}\text{C}$ )	Mesophile ( $20\text{--}45^{\circ}\text{C}$ )	Thermophile ( $45\text{--}80^{\circ}\text{C}$ )	Hyperthermophile ( $> 80^{\circ}\text{C}$ )
	Salinity <sup>b</sup>		Non-halophile ( $< 1.2\%$ )	Halotolerant ( $1.2\text{--}2.9\%$ ; tolerate $\leq 14.6\%$ )	Halophile ( $> 8.8\%$ )	Extreme halophile ( $> 14.6\%$ , cannot grow $< 8.8\%$ )
	Pressure			Piezotolerant or barotolerant ( $0.1\text{--}10 \text{ MPa}$ )	Piezophile or barophile ( $10\text{--}50 \text{ MPa}$ )	Hyperpiezophile or hyperbarophile ( $> 50 \text{ MPa}$ )
	Water activity			Xerophile ( $a_w < 0.7$ )		
	Polyextremophile			Tolerance or preference for multiple parameters combined		

<sup>a</sup>The 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. <sup>b</sup>Salinity 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<sub>2</sub>.



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

## Exemples de polyextrêmophiles





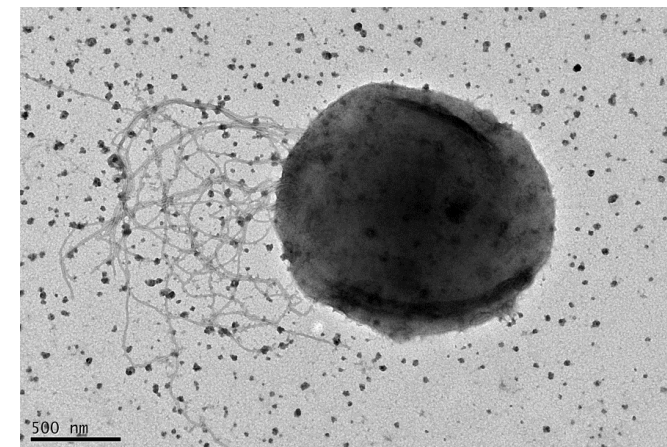
Copyright K.O. Stetter, R. Huber and R. Rachel, University of Regensburg, Germany

### Record de vie à haute température

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



### Record de radiorésistance

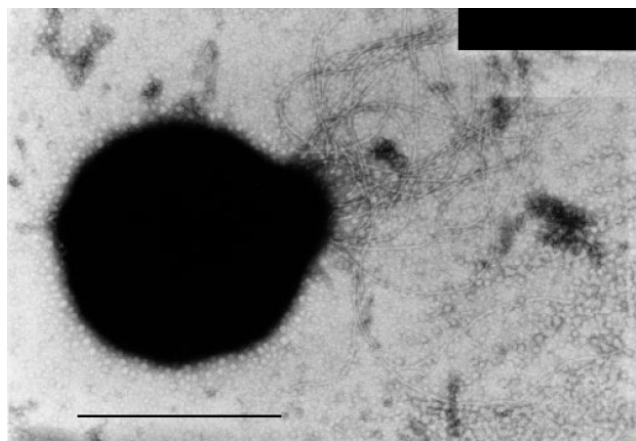
- Archée *Thermococcus gammatolerans*
-  Peut résister à une irradiation (dose absorbée) de 30 kGy et supporter une dose instantanée de 5 kGy sans perte de viabilité (= dose létale pour l'homme)
-  55 - 95°C



Copyright C. Dalmasso, K. Alain, France

### Record de vie sous pression

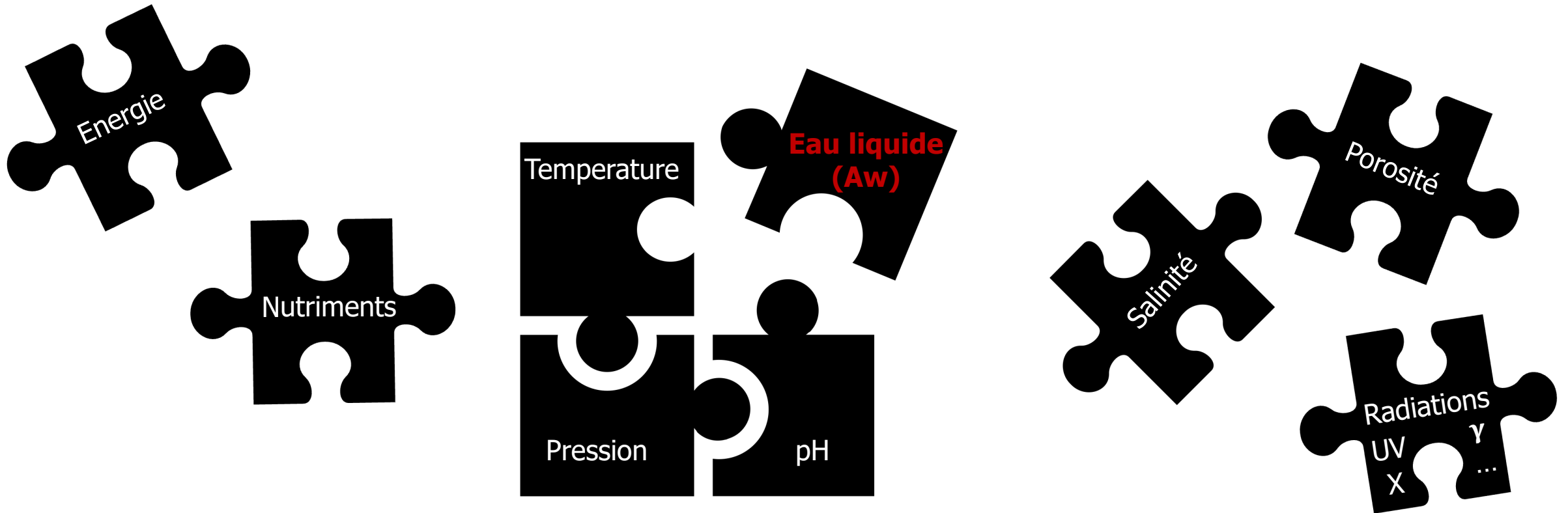
- Archée *Thermococcus piezophilus*
- 5000 m de profondeur
-  0,1 - 125 MPa (75°C)
-  60 - 95°C



Copyright Jolivet et al., France

## 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

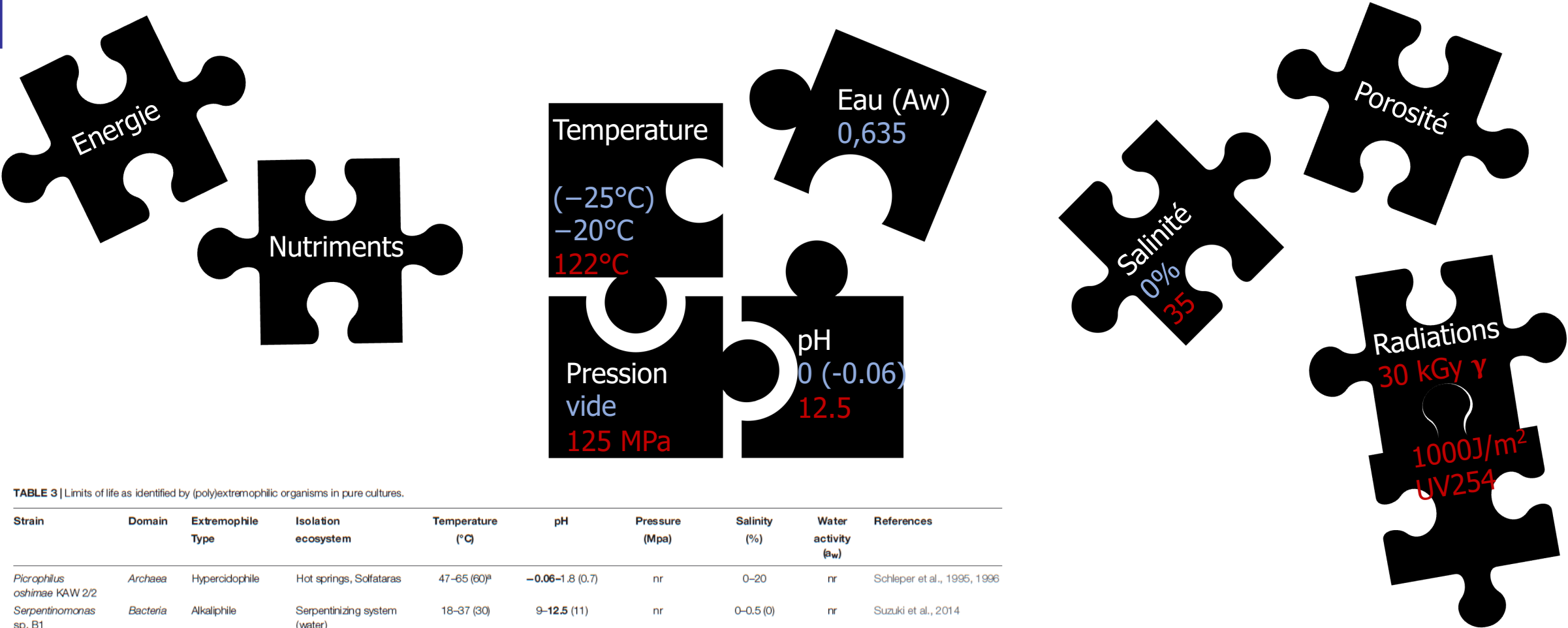


TABLE 3 | Limits of life as identified by (poly)extremophilic organisms in pure cultures.

Strain	Domain	Extremophile Type	Isolation ecosystem	Temperature (°C)	pH	Pressure (Mpa)	Salinity (%)	Water activity (a <sub>w</sub> )	References
<i>Picrophilus oshimae</i> KAW 2/2	Archaea	Hyperacidophile	Hot springs, Solfataras	47–65 (60) <sup>a</sup>	<b>−0.06</b> –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– <b>12.5</b> (11)	nr	0–0.5 (0)	nr	Suzuki et al., 2014
<i>Methanopyrus kandleri</i> 116	Archaea	Hyperthermophile	Deep-sea hydrothermal vent	90– <b>122</b> (105)	(6.3–6.6)	0.4–40	0.5–4.5 (3.0)	nr	Takai et al., 2008
<i>Planococcus halobryophilus</i> Or1	Bacteria	Halopsychrophile	Sea ice core	<b>−15</b> –37 (25)	6–11 (7–8)	nr	0–19 (2)	nr	Mykytczuk et al., 2012, 2013
<i>Halarsenatibacter silvemanii</i> SLAS-1	Bacteria	Haloalkaliphile	Soda lake	28–55 (44)	8.7–9.8 (9.4)	nr	20–35 ( <b>35</b> )	nr	Orenland et al., 2005
<i>Thermococcus piezophilus</i> CDGS	Archaea	Piezothermophile	Deep-sea hydrothermal vent	60–95 (75)	5.5–9 (6)	0.1– <b>125</b> (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	<b>0.635</b>	Javor, 1984

<sup>a</sup>Data presented as range (optimum) for each parameter. nr, not reported in the original publication. Current limits are highlighted in bold.

➤ Les extrêmophiles 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**

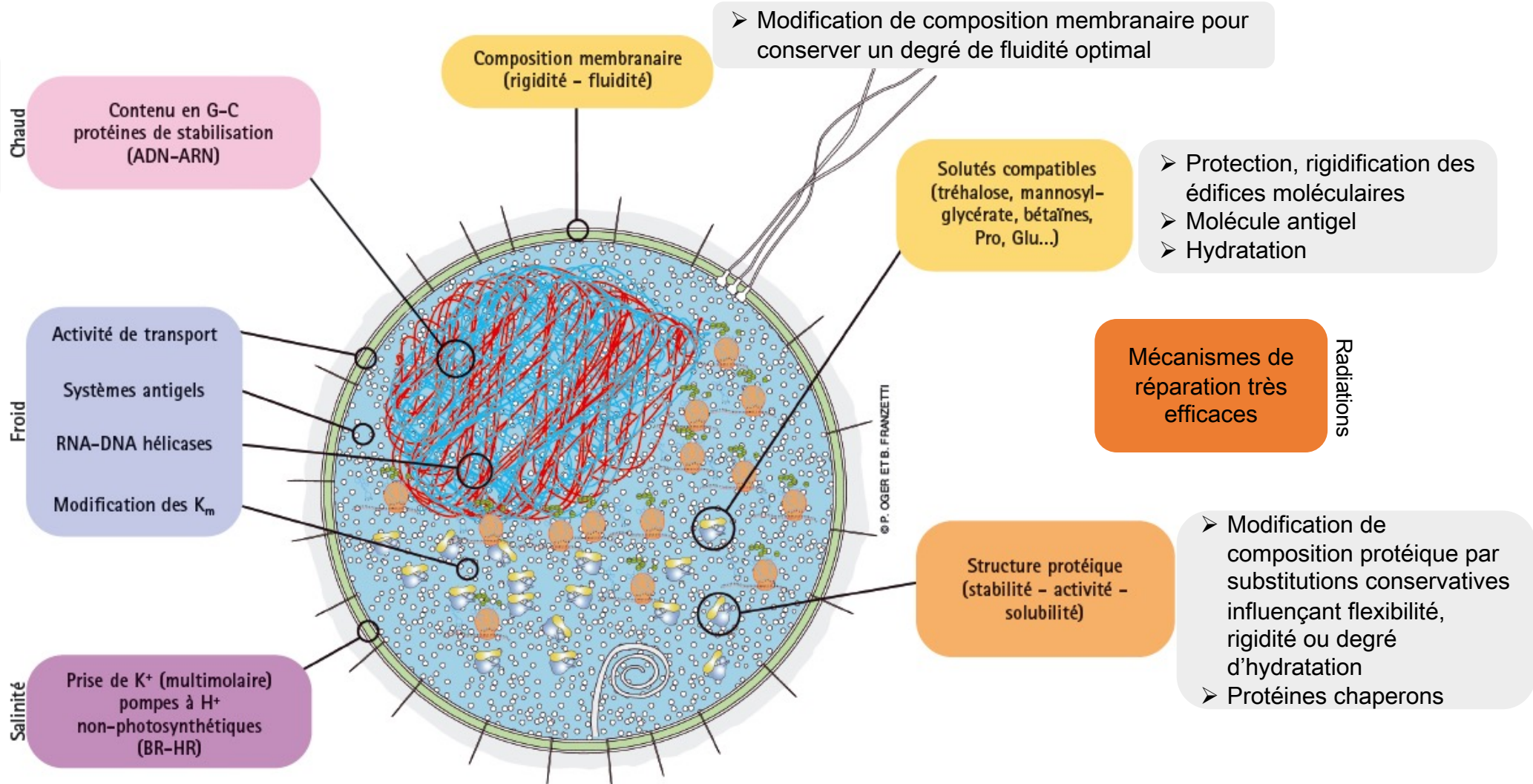


**Hydratation**

# 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

# Conclusions

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

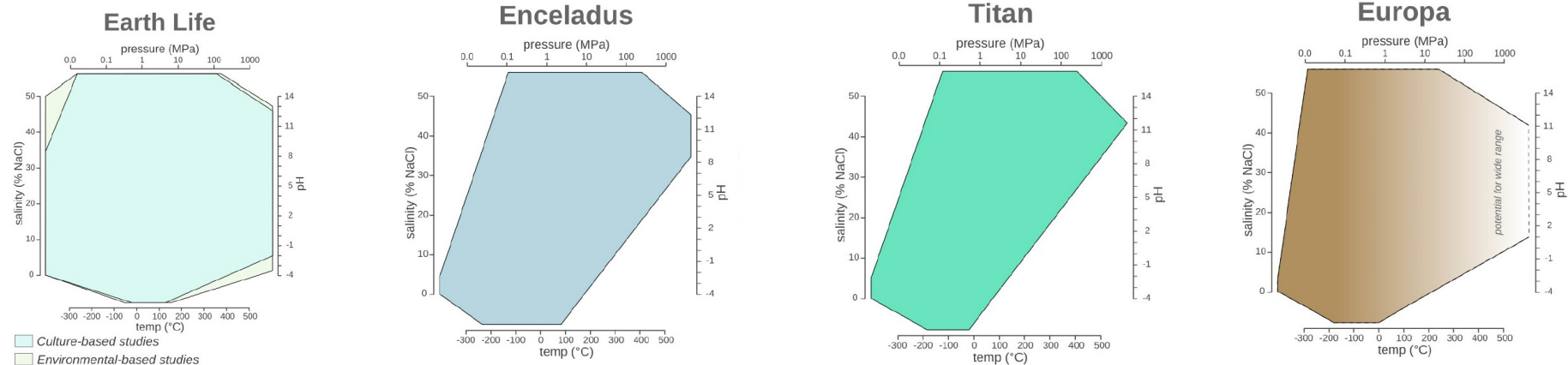
La vie n'a pas été détectée à :

- $T^{\circ} > 122^{\circ}\text{C}$  (N.B. : les considérations thermodynamiques concernant la stabilité des macromolécules prédisent que la vie pourrait être possible entre  $-40^{\circ}\text{C}$  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 pH 1 à 3)

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

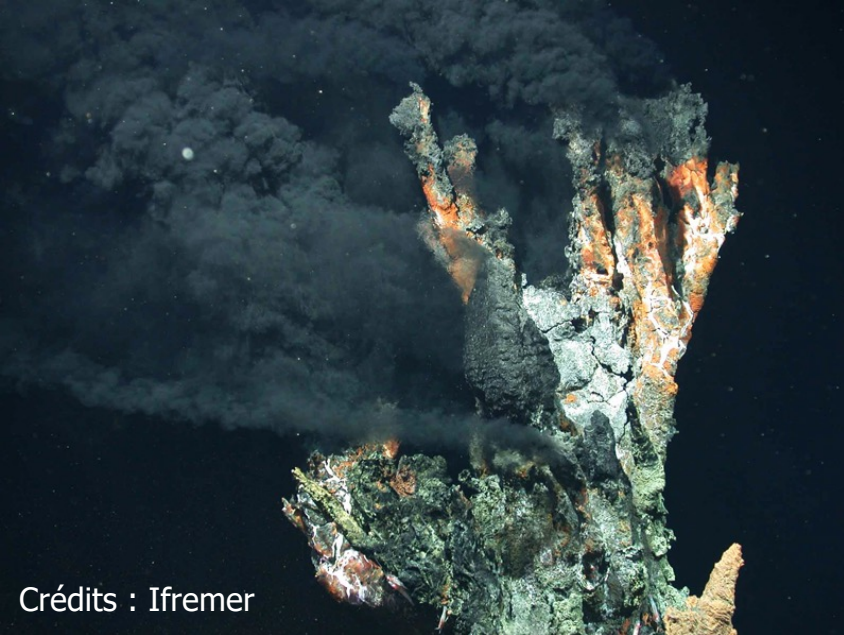
- .... et pourraient nous aider à déterminer quels océans souterrains sur les lunes glacées pourraient être habitables, étant donné que la présence d'eau à l'état liquide semble essentielle à la vie**

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



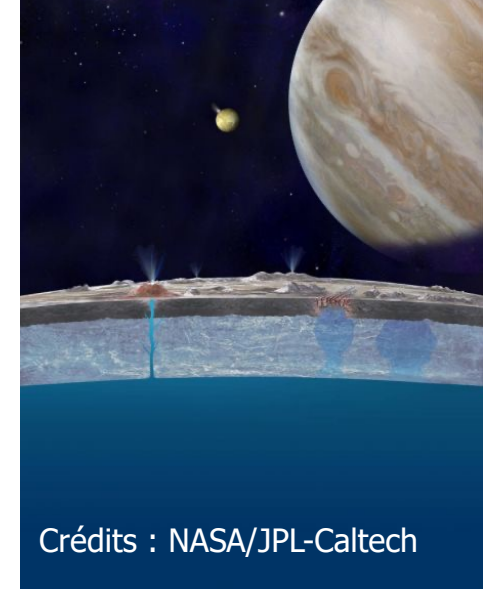
Projection des limites physico-chimiques de la vie sur Terre en termes de  $T^{\circ}$ , P, pH et salinité sur d'autres corps planétaires





Crédits : Ifremer

**Merçi de votre attention**



Crédits : NASA/JPL-Caltech

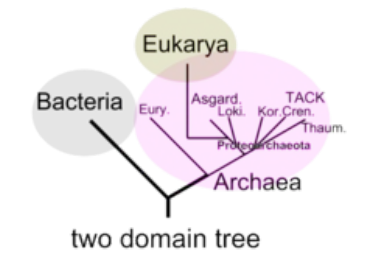
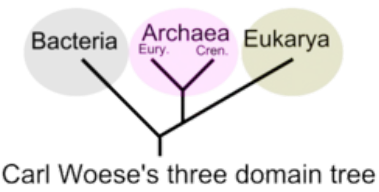



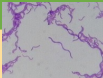
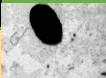


Crédits : Ron Miller



Crédits : NASA/JPL-Caltech

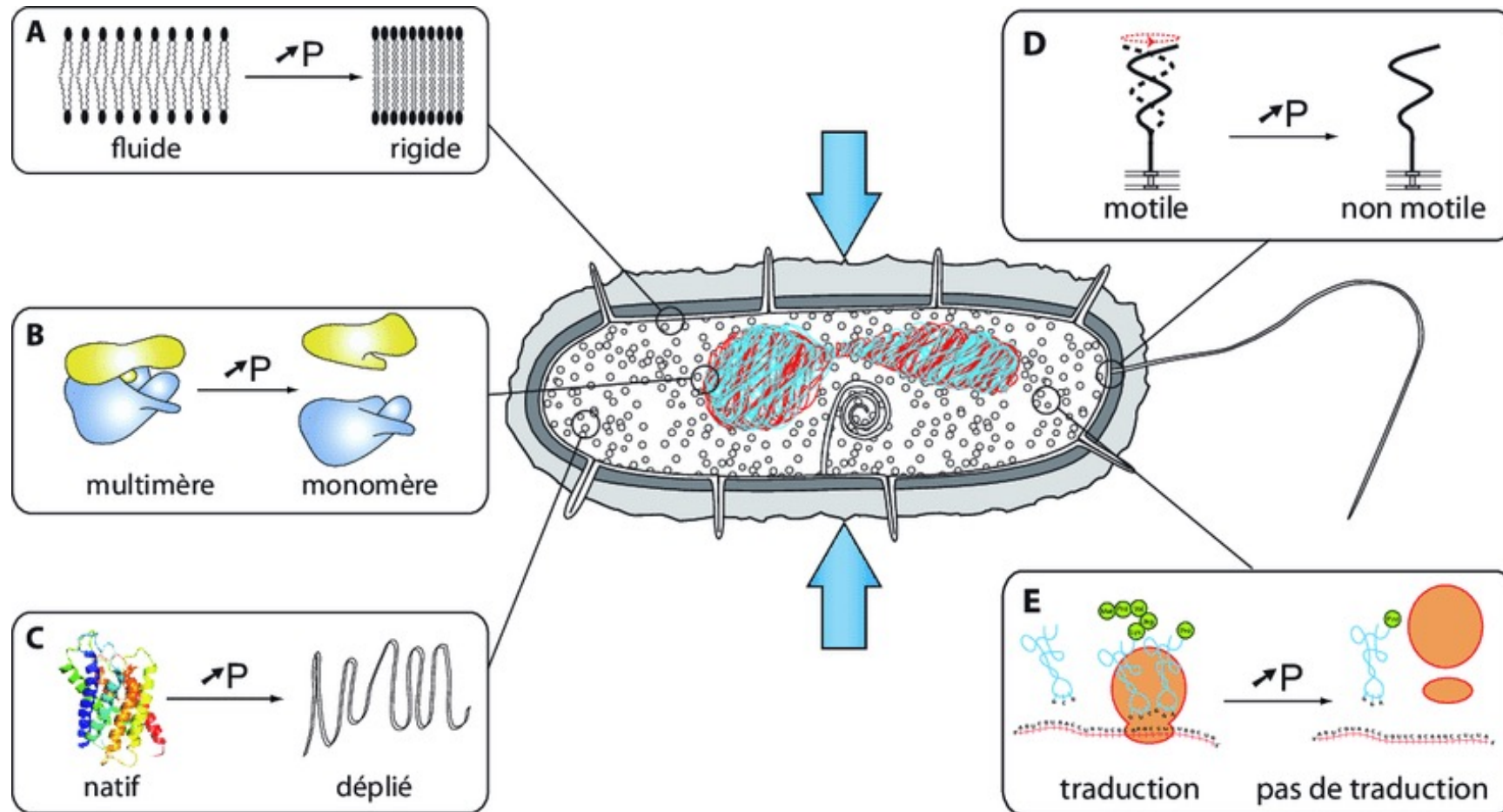
# Les Archées



	Bactéries		Archées	Eucaryotes	
Morphologie, taille		 Petite (1-10 $\mu\text{m}$ )	 		> 10 $\mu\text{m}$
Compartiments intracellulaires	Non Pas de vrai noyau (nucleoïde)			Oui Noyau	
Gestion de l'énergie	Membrane			Organites dans la cellule (mitochondries)	
ADN	Généralement circulaire (chromosome unique le + souvent)			Molécules linéaires général <sup>ment</sup> (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...		

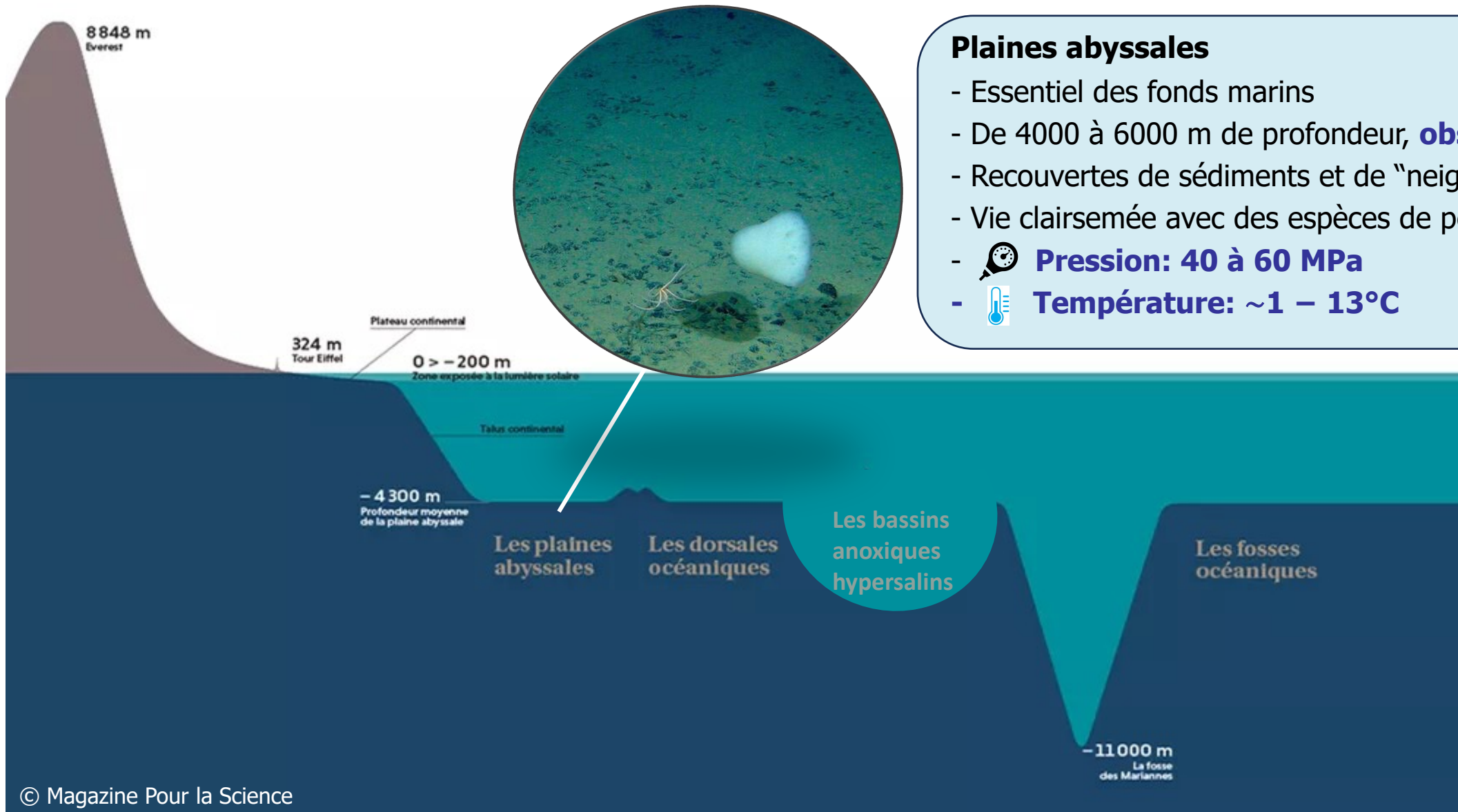
## Comment vivre dans des conditions extrêmes

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





# Des écosystèmes remarquables jusqu'au plus profond des océans



## Plaines abyssales

- Essentiel des fonds marins
- De 4000 à 6000 m de profondeur, **obscurité**
- Recouvertes de sédiments et de "neige marine"
- Vie clairsemée avec des espèces de petite taille
- 🕒 **Pression: 40 à 60 MPa**
- 🌡️ **Température: ~1 – 13°C**