



# LE SYSTÈME PLANÉTAIRE « TERRE »

---



**Webinaire n°1**  
**Du 5 octobre 2023**  
**Michel Jauzein,**  
**Professeur de Science des Sols**



1. Introduction sur le système Terre
2. La lithosphère
3. L'hydrosphère
4. L'atmosphère
5. La biosphère
6. Des cycles dynamiques



# 1 – LE SYSTÈME TERRE



# Systeme ? Les inventeurs du concept

- **Karl Ludwig Von Bertalanffy** : biologiste autrichien, fondateur en 1954 de la « Société pour l'étude des systèmes généraux », a publié « *General System Theory* » en 1968 (U. Vienne, U. Alberta)
- **Norbert Wiener** : mathématicien américain, zoologue, a publié « *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine* » en 1948 (MIT)
- **Claude Elwood Shannon** : ingénieur en génie électrique américain, a publié « *A Mathematical Theory of Communication* » en 1948 (MIT)
- **Warren Sturgis McCulloch** : neurologue américain, initiateur des rencontres interdisciplinaires, dites Conférences Macy, a publié avec *Walter Pitts* « *A logical calculus of the Ideas Immanent in Nervous activity* » en 1943 (Harvard, MIT)
- **Jay Wright Forrester** : ingénieur informaticien américain, fondateur de la dynamique des systèmes, a publié « *Industrial dynamics* » en 1961, « *Principle of Systems* » en 1968, « *Urban Dynamics* » en 1969 et « *World Dynamics* » en 1973 (MIT)

# Des vulgarisateurs :

- *Des « vulgarisateurs » :*

- *Dennis Meadows*, américain spécialiste en gestion des systèmes (U. New Hampshire), *Donella Meadows*, américaine spécialiste en sciences environnementales (U. Darmouth) et *Jorgen Randers*, spécialiste en stratégie climatique (Norwegian Business School), élèves de *Jay Wright Forester* au MIT, et auteurs de « Les limites à la croissance » en 1972 pour le Club de Rome
- *Joël Fromet de Rosnay*, français de l'île Maurice d'origine bourguignonne, informaticien et biologiste, écrivain (MIT, Institut Pasteur), auteur du « Macroscopie » en 1975



# Qu'est-ce qu'un système ?

## *Définitions d'un système par :*

- *Joël Fromet de Rosnay* : « Ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but »
- *Edgar Nahoum dit Morin* (sociologue et philosophe de la pensée complexe français d'origine italienne, CNRS) : « Unité globale organisée d'inter-relations entre éléments, actions ou individus »

## *Quatre concepts fondamentaux :*

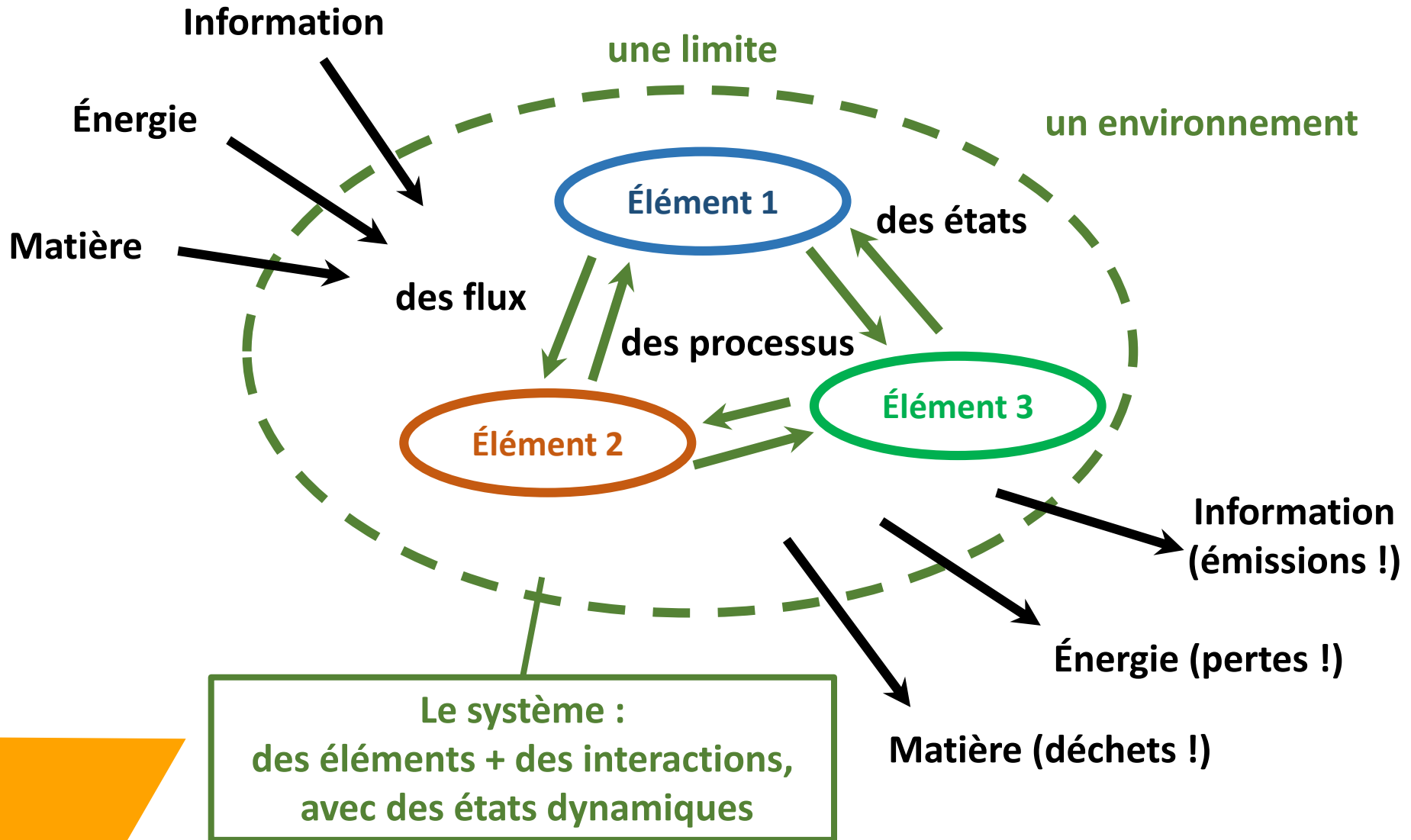
- L'interaction
  - La globalité
    - L'organisation
      - La complexité

# Différents systèmes :

*Suivant les interactions prises en compte :*

- Des systèmes physiques
  - Des systèmes chimiques ou physico-chimiques
    - Des systèmes vivants ou biogéochimiques
      - Des systèmes artificiels ou manufacturés
        - Des systèmes sociaux ou socio-économiques
          - Des systèmes d'idées ou de pensées
            - ...

# Une schématisation globale :



# La planète Terre vue de son environnement



© NASA

*Une bille bleue... un système ?*

# Un système physique :

*Analogie « une bille bleue » d'environ 12 740 km de diamètre*

- Une limite imprécise avec son environnement
  - # Sphérique entre l'atmosphère et l'espace...
    - Entre 100 km (limite aéronautique de Kármán) et 5 000 km (densité de particules de  $100/\text{cm}^3$  # milieu interplanétaire) au-dessus de la « surface terrestre » suivant les interactions prises en compte
- Deux interactions principales avec le système solaire
  - La force de gravité
    - elle règle les orbites de la Terre autour du Soleil et de la Lune autour de la Terre
    - elle organise la matière du système Terre suivant la densité des corps qui le compose
  - Le rayonnement solaire et celui de la planète
    - Ils assurent les principaux échanges énergétiques entre la planète et son environnement interplanétaire

# Un système chimique :

## *Analogie « un glaçon sphérique »*

- Une atmosphère gazeuse
  - 78 % de diazote et 21 % d'oxygène
  - Pression au niveau de sa surface océanique d'environ 1 atm ( $10^5$  Pa), variable avec le temps suivant la météorologie (dépressions et anticyclones), décroissante avec l'altitude
  - Température variable avec l'altitude, la latitude et le temps avec une moyenne au niveau de sa surface océanique d'environ 15°C (profil vertical complexe dans l'atmosphère)
- Une hydrosphère océanique liquide
  - 1,4 milliard de  $\text{km}^3$  d'eau salée (environ 30 g de NaCl par kg d'eau)
  - 97 % d'eau et 3 % de NaCl dissout ( $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ )
  - Pression croissante avec la profondeur (+  $10^5$  Pa tous les 10 m)
  - Température variable avec la profondeur, la latitude et le temps (dynamique complexe des courants et des transferts thermiques)

# Une bille bleue, un glaçon sphérique...

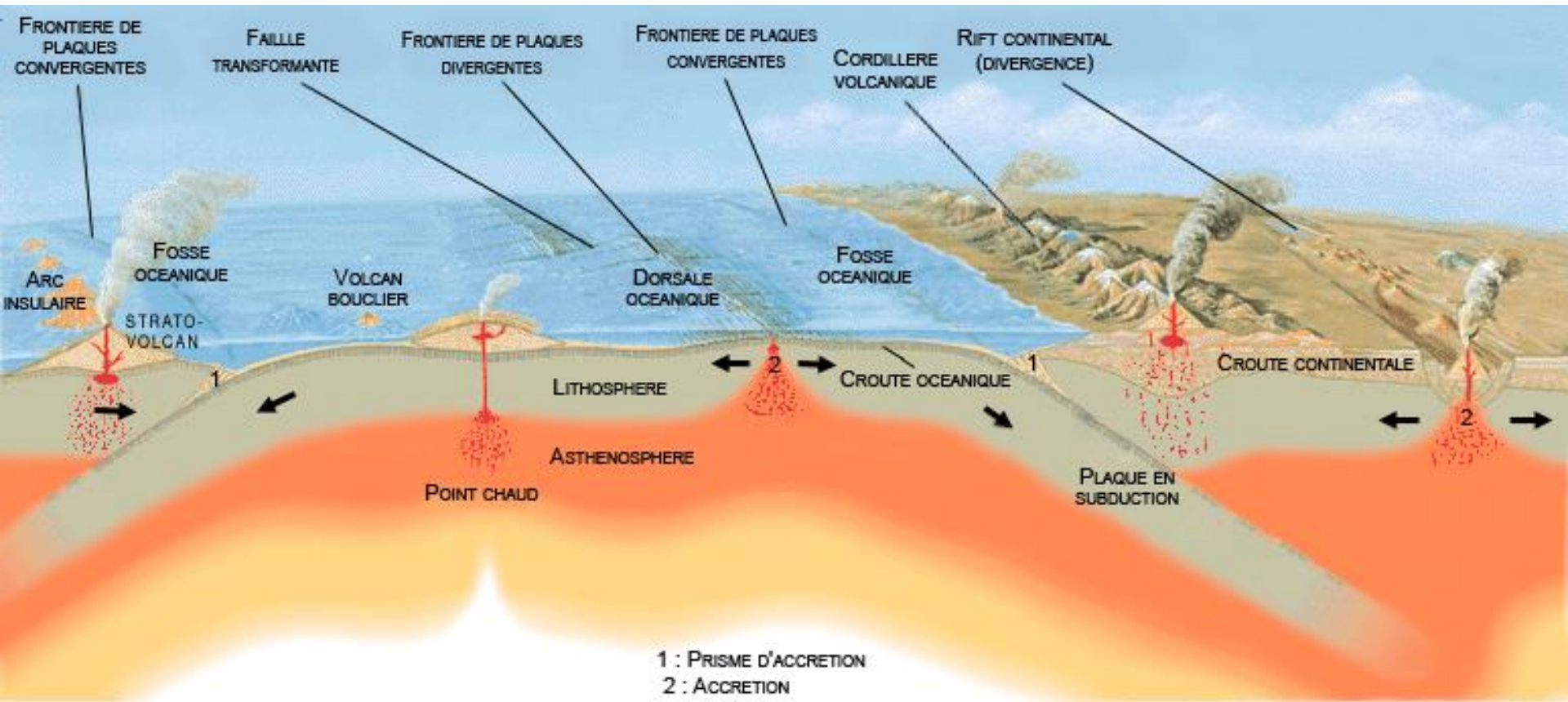


# Un système chimique :

## *Analogie « un galet minéral »*

- **Une lithosphère solide apparemment rigide en surface**
  - En surface sur les continents ou sous les océans : une croûte terrestre solide fracturée, composée de plaques dérivantes
  - 95 % de silicates et aluminosilicates, 5 % de carbonates et d'oxydes et hydroxydes métalliques de fer
  - Roches composées de minéraux divers
  - Croûte océanique plutôt basaltique (densité 2,9 ; épaisseur 6 km)
  - Croûte continentale plutôt granitique (densité 2,7 ; épaisseur 35 km)
- **Une lithosphère sous-jacente solide mais plastique**
  - Le manteau supérieur est plutôt rigide jusqu'à environ 660 km de profondeur entre 440°C et 1600°C (pression jusqu'à 24 Gpa)
  - Le manteau inférieur est ductile jusqu'à 2900 km de profondeur entre 1600°C et 2300°C (pression de 24 à 127 Gpa)

# La dérive des continents, et la tectonique des plaques



© José F. Vigil — travail personnel à partir de « Cross section by José F. Vigil from This Dynamic Planet »  
U.S. Geological Survey, the Smithsonian Institution, and the U.S. Naval Research Laboratory, CC BY-SA 3.0

Un litchi à la peau craquelé... dynamique ?

# Un galet minéral, un litchi craquelé...



© [https://forums.futura-sciences.com/attachments/geologie-catastrophes-naturelles/389907d1559550055-galet-spherique-pierre-de-torrent-img\\_1949.jpg](https://forums.futura-sciences.com/attachments/geologie-catastrophes-naturelles/389907d1559550055-galet-spherique-pierre-de-torrent-img_1949.jpg)

© <https://www.takamakawinery.com/le-litchi/>

# Un système vivant :

## *Analogie « une pierre moussue »*

- **Une biosphère aux interfaces**
  - En surface des continents : une végétation couvrante, siège de 57 % des flux d'oxygène et représentant 82 % de la biomasse
  - En surface des océans : un phytoplancton photosynthétique siège de 43 % des flux d'oxygène et représentant moins de 1 % de la biomasse
  - En surface des continents : une couverture « pédologique » de sols abritant une part importante d'êtres vivants de la biosphère (85 % de la biomasse est terrestre pour 80 % de la biodiversité en nombre d'espèces)
  - Dans les océans : une autre part moins importante d'êtres vivants de la biosphère (2 % de la biomasse est marine pour 20 % de la biodiversité en nombre d'espèces) colonise principalement la surface des océans, les marges continentales et les bordures côtières.
  - Dans la lithosphère plus profonde : une réserve de biomasse plutôt ancienne composée principalement de bactéries et d'archées (13 % de la biomasse, biodiversité faible de 0,1 % en nombre d'espèces)

# Une pierre moussue, une planète vivante...



Qui reste composée d'atomes...

© <https://vegetal.shop/fr/mousse-naturelle-stabilisee-en-carton-pour-cadre-tableau-vegetal/1965-boule-de-mousse-plate-verte-sans-entretien-naturel-stabilise-vegetal-shop.html>

© NASA



## 2 – LA LITHOSPHERE



# Des atomes, des minéraux, des roches...



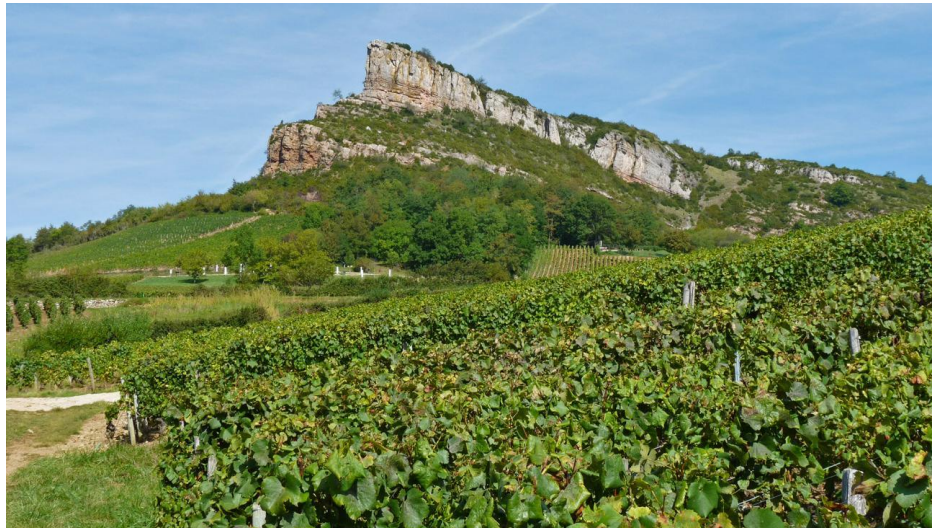
**Côte de Granit Rose, Côtes-d'Armor**

*Roches Plutoniques  
(granitiques)*



**Piton de la Fournaise, île de la Réunion**

*Roches Volcaniques  
(basaltiques)*



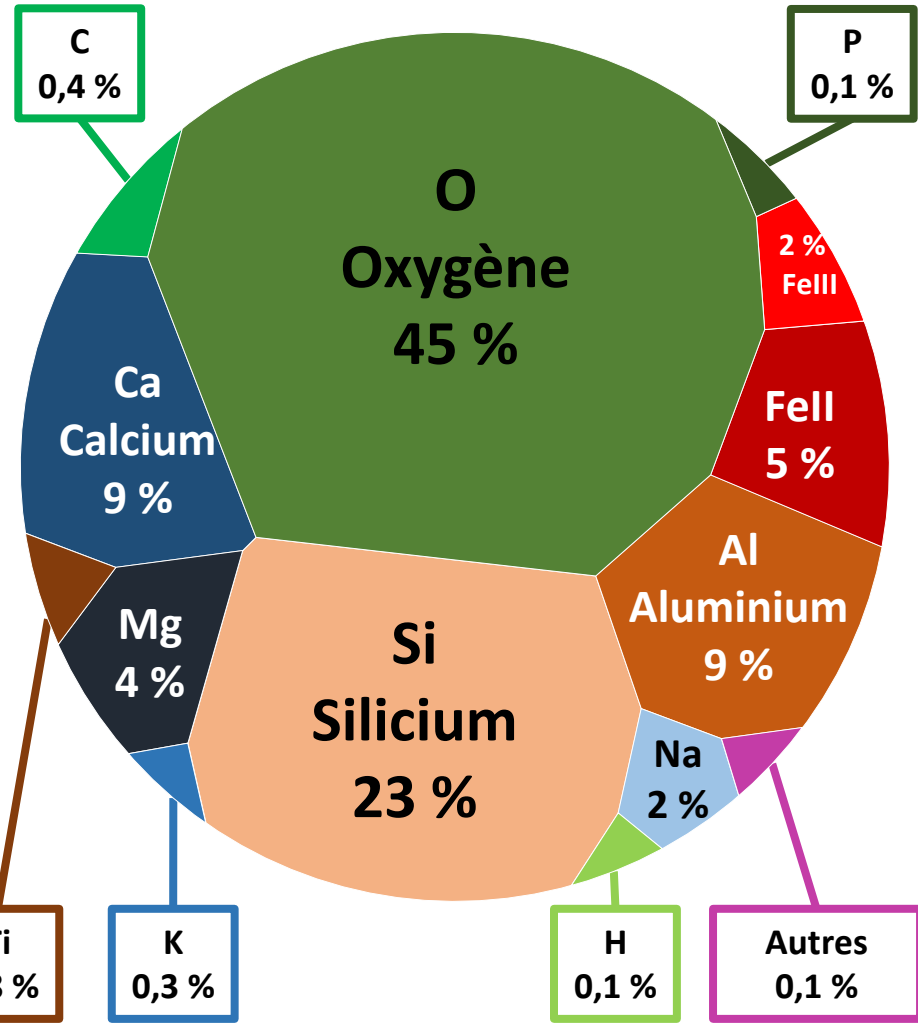
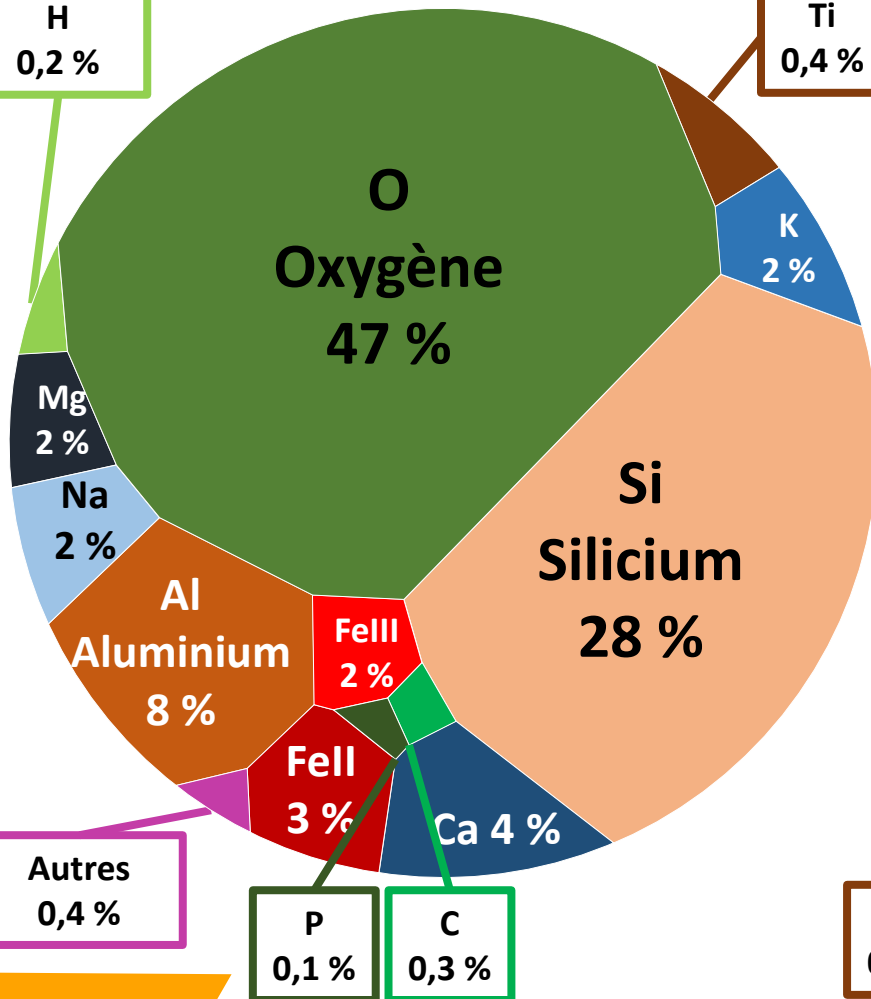
**Roche de Solutré, Saône-et-Loire**

*Roches Sédimentaires  
(calcaires, grès, argiles...)*

# Composition élémentaire...

Croûte continentale (granitique)

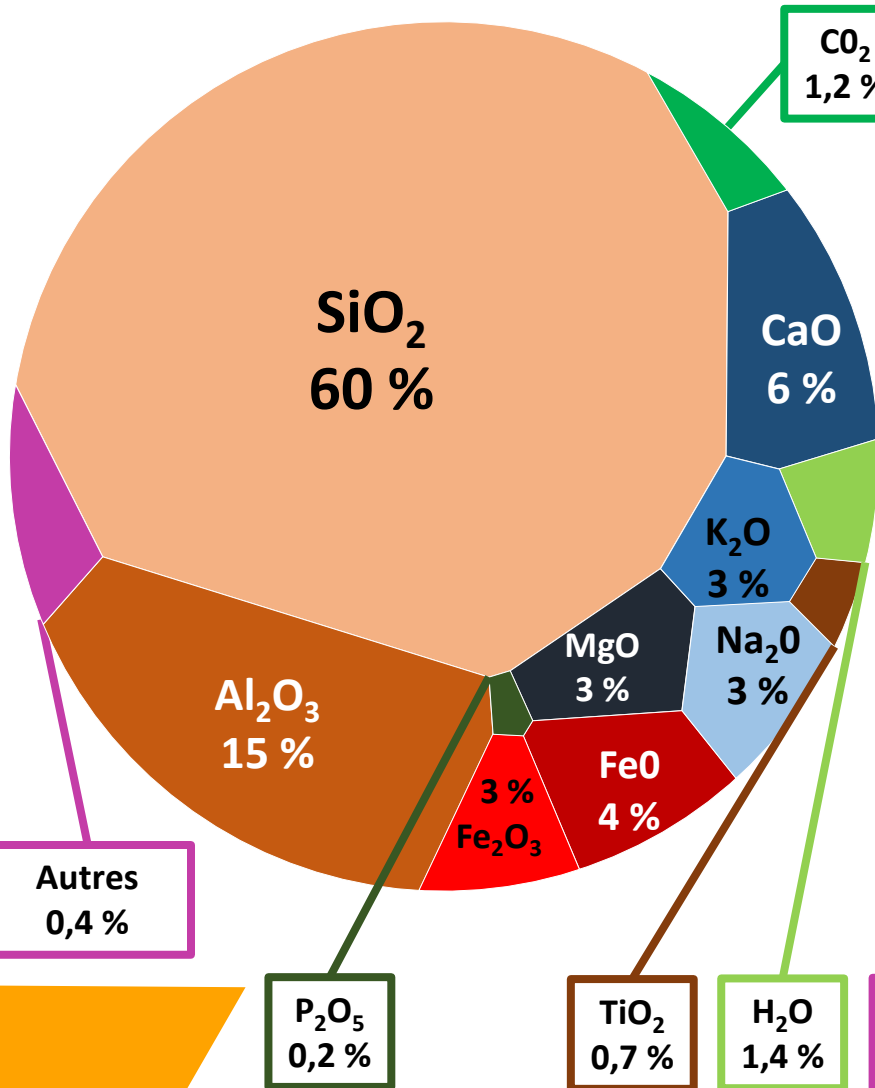
Croûte océanique (basaltique)



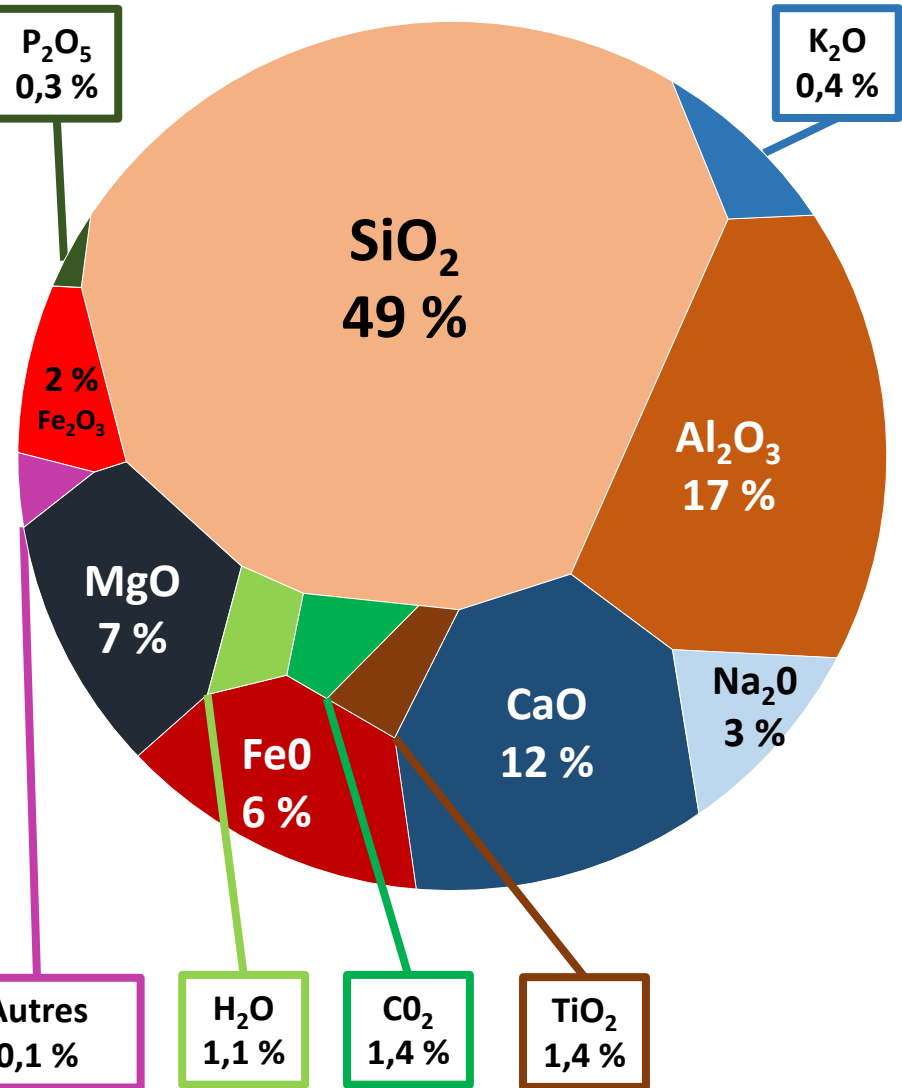
Geoff C. Brown et Alan E. Mussett, *The Inaccessible Earth*, Taylor & Francis, 1981, 2<sup>e</sup> éd., 235 p. (ISBN 0-04-550028-2), p. 166 Note: After Ronov and Yaroshevsky (1969)

# Composition en oxydes...

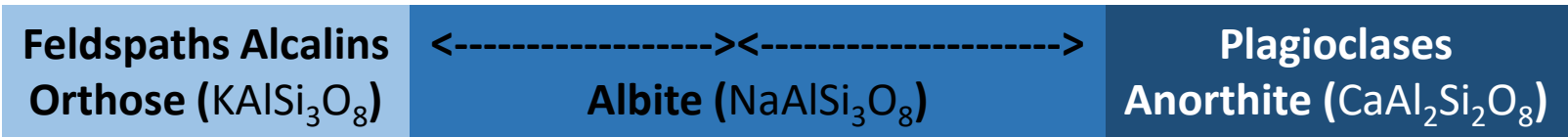
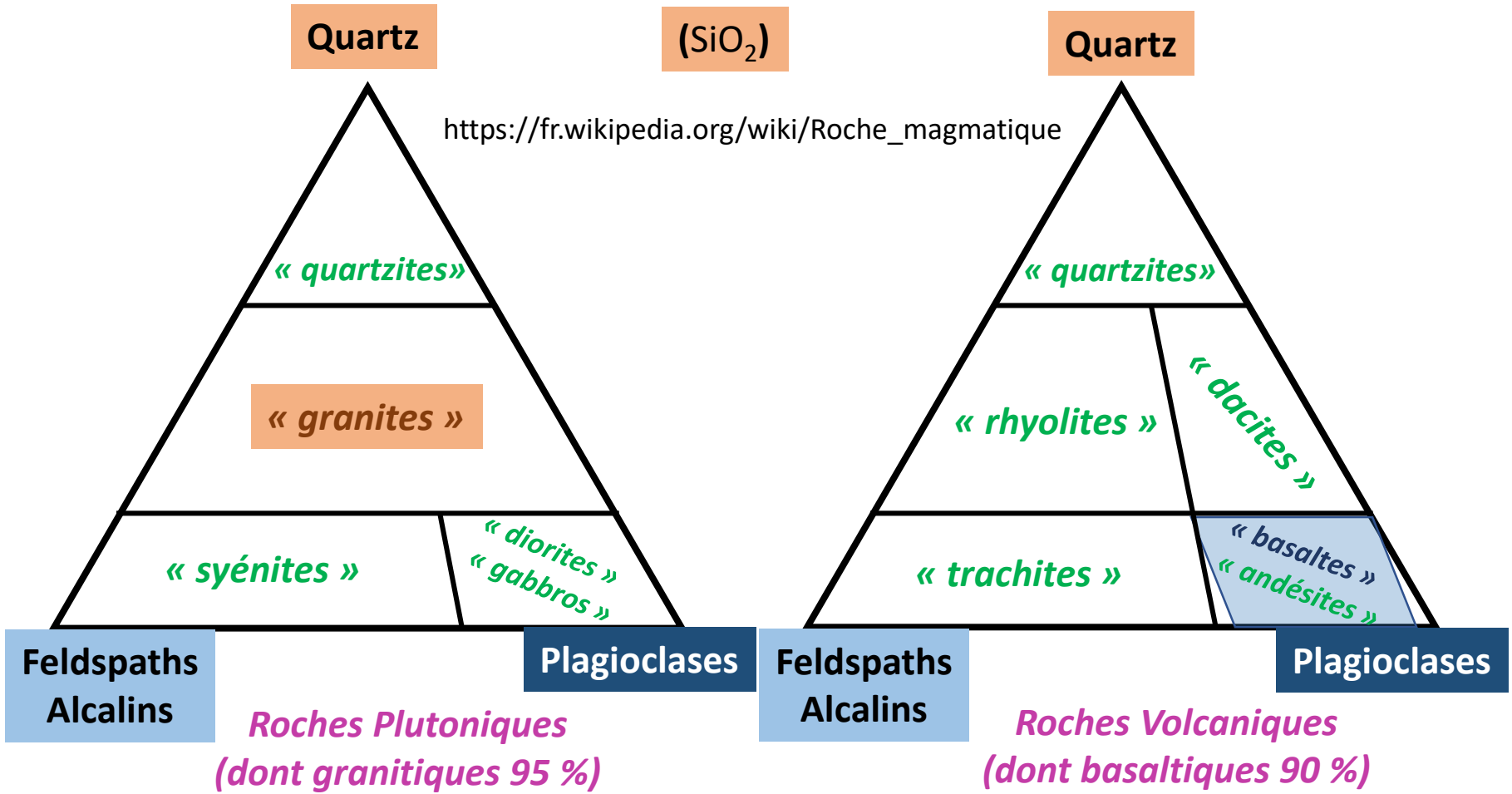
Croûte continentale (granitique)



Croûte océanique (basaltique)



# Types de roches magmatiques... et minéraux principaux...



# Types de roches sédimentaires... et minéraux principaux...

Calcaire (CaCO<sub>3</sub>)

« grès marneux »  
« marnes sableuses »

« calcaires »

« marnes »

« sables »  
« grès »

« argiles »

Quartz (SiO<sub>2</sub>)

Argiles ?

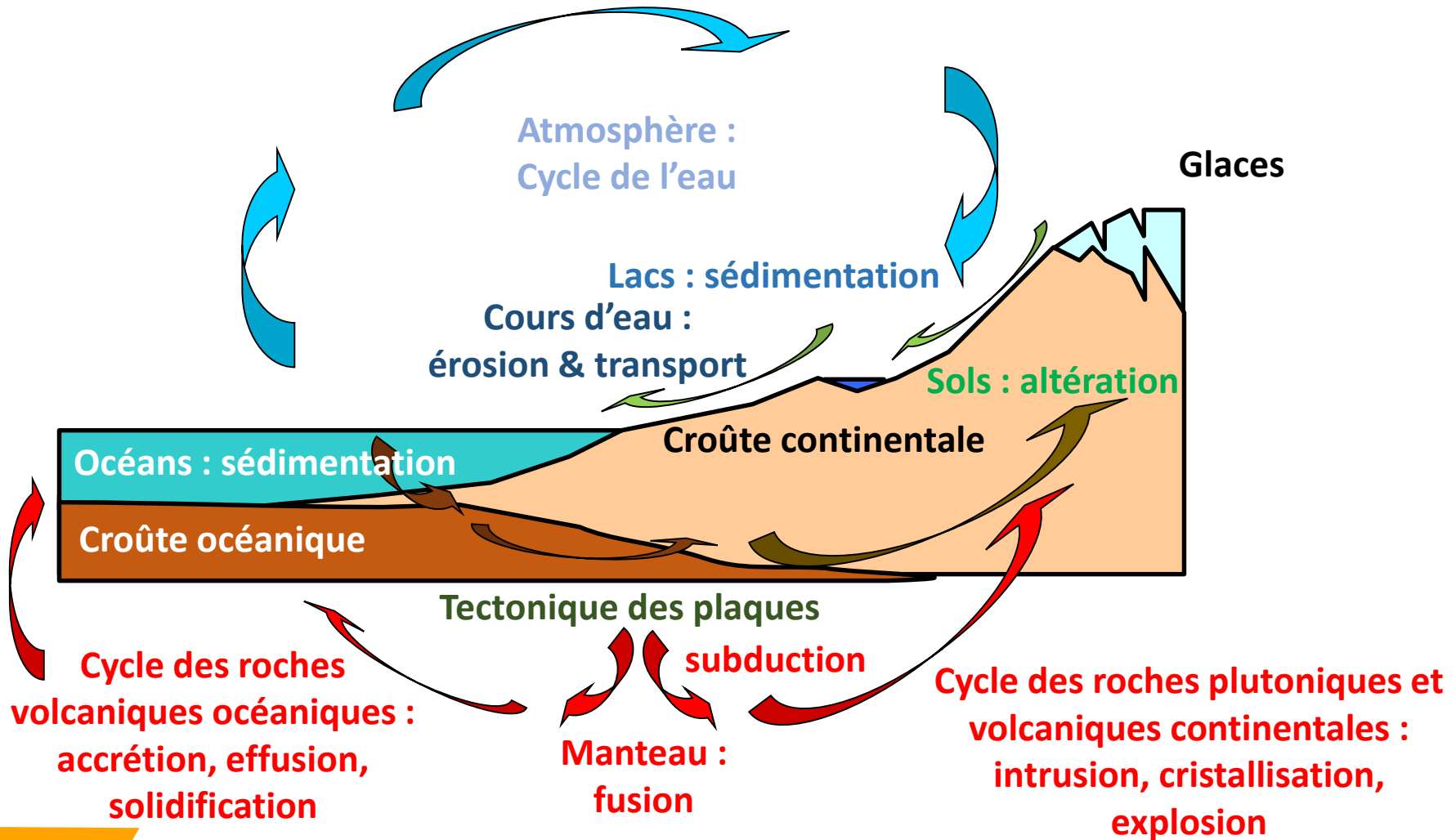
*Roches Sédimentaires*  
(calcaires, grès, argiles...)

Les argiles sont des phyllosilicates, minéraux en feuillets, issus principalement de l'altération des minéraux des roches magmatiques. Ils se retrouvent majoritairement sous forme de particules fines dans les sols et les sédiments.

- [(Si,Al)O<sub>2</sub>]<sub>m</sub><sup>x-</sup>
- [(Al, Mg, FeIII, FeII)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>]<sub>n</sub><sup>y-</sup>
- [Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>]<sub>o</sub><sup>z+</sup>
- [H<sub>2</sub>O]<sub>p</sub>

feuillets tétraédriques  
feuillets octaédriques  
cations échangeables  
eau d'hydratation

# Une dynamique interne et externe...





## 3 – L'HYDROSPHÈRE

—

# Des atomes, de l'eau, des sels solubles...



**Au-dessus** (© peangdao, Adobe Stock)

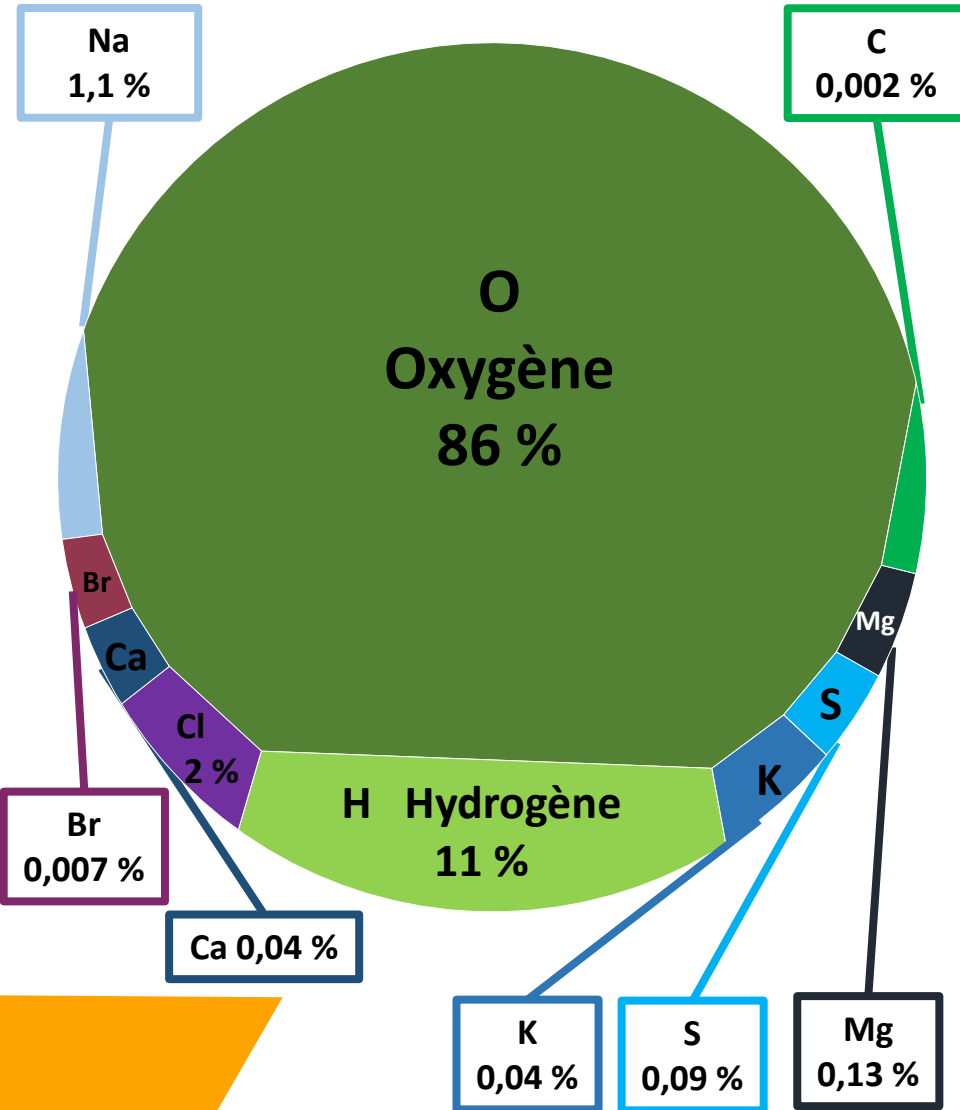
*Des océans d'eau salée (93,9 %)  
Sur presque  $\frac{3}{4}$  du Globe (70,8 %)*



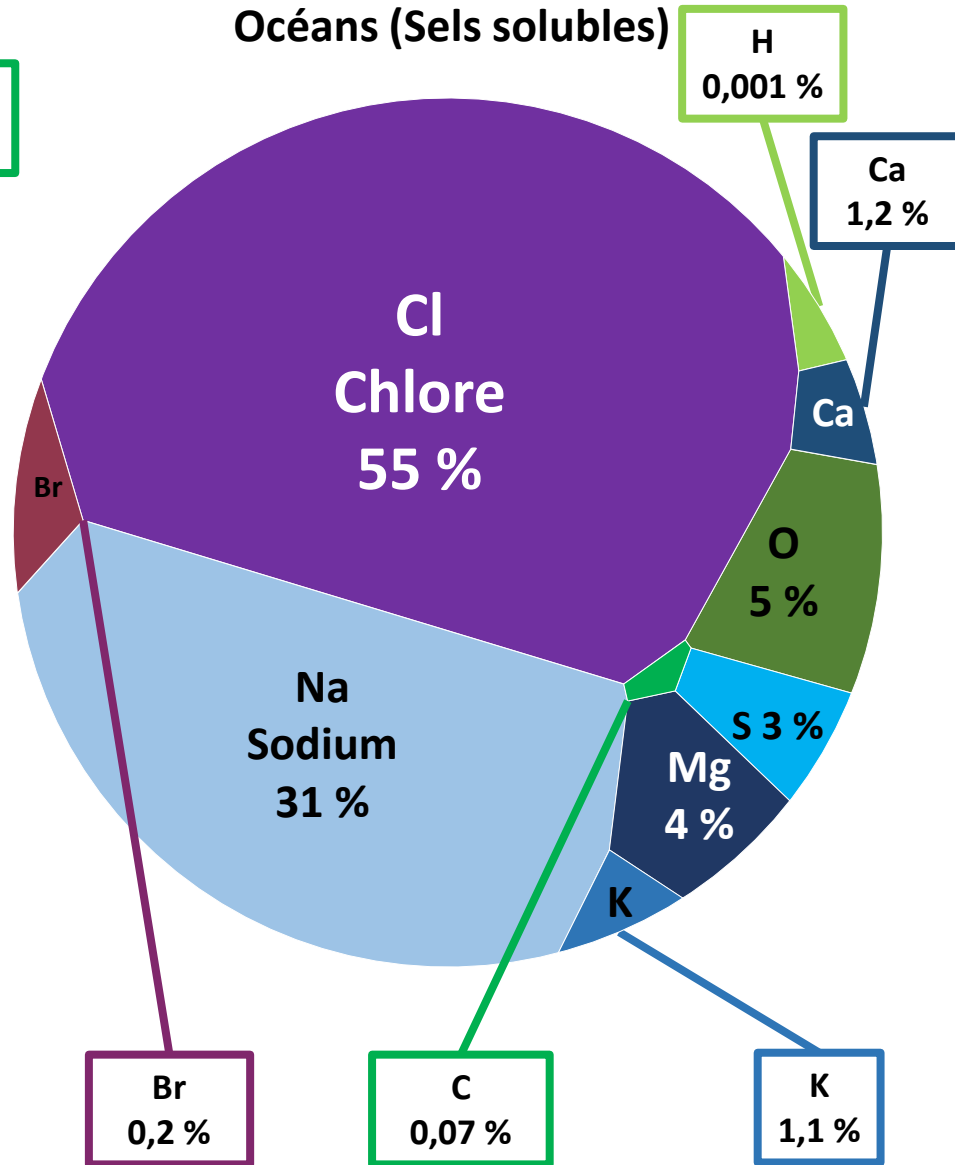
**Au-dessous** (via Shutterstock)

# Composition élémentaire...

Océans (Eau comprise)

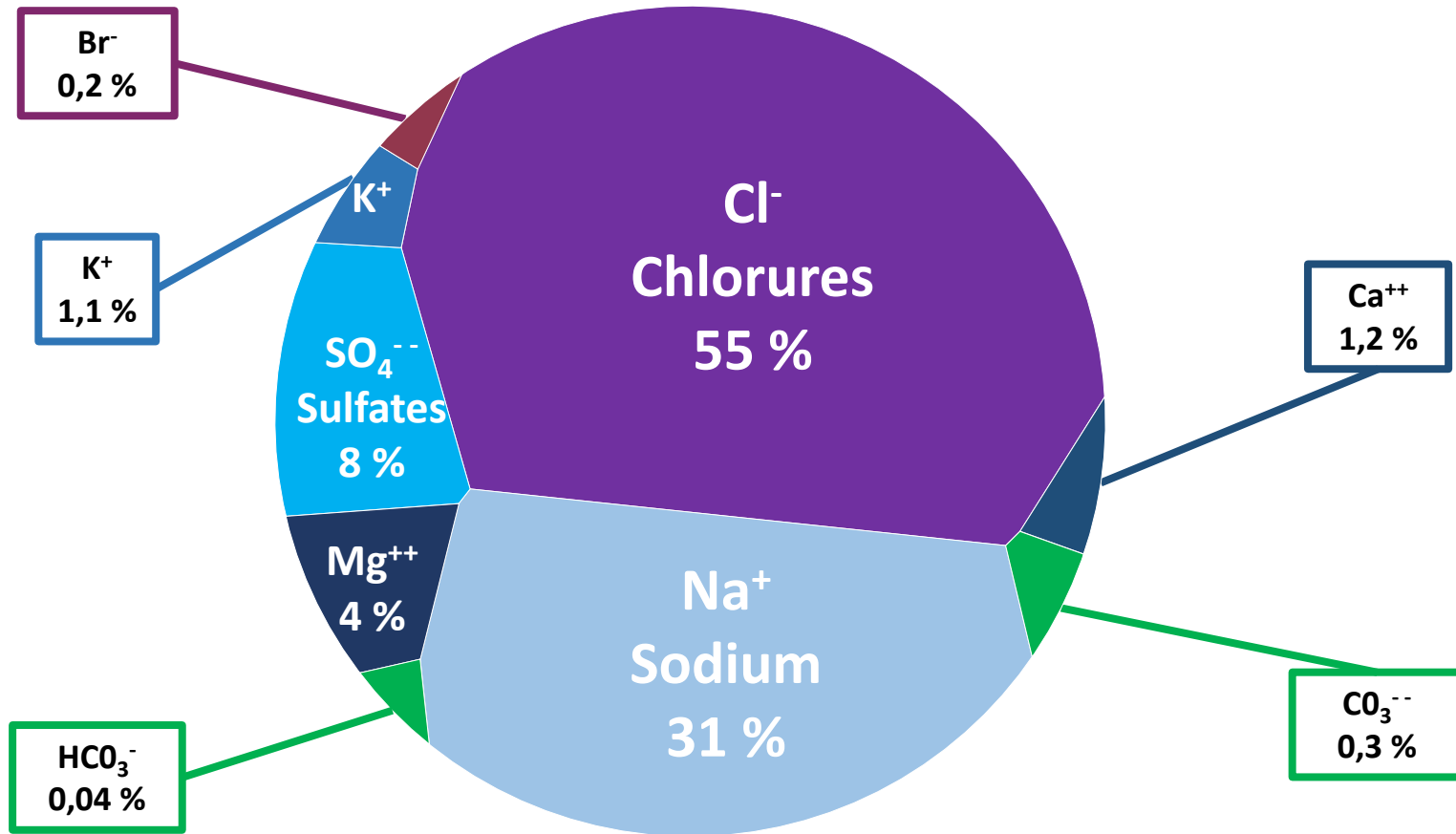


Océans (Sels solubles)

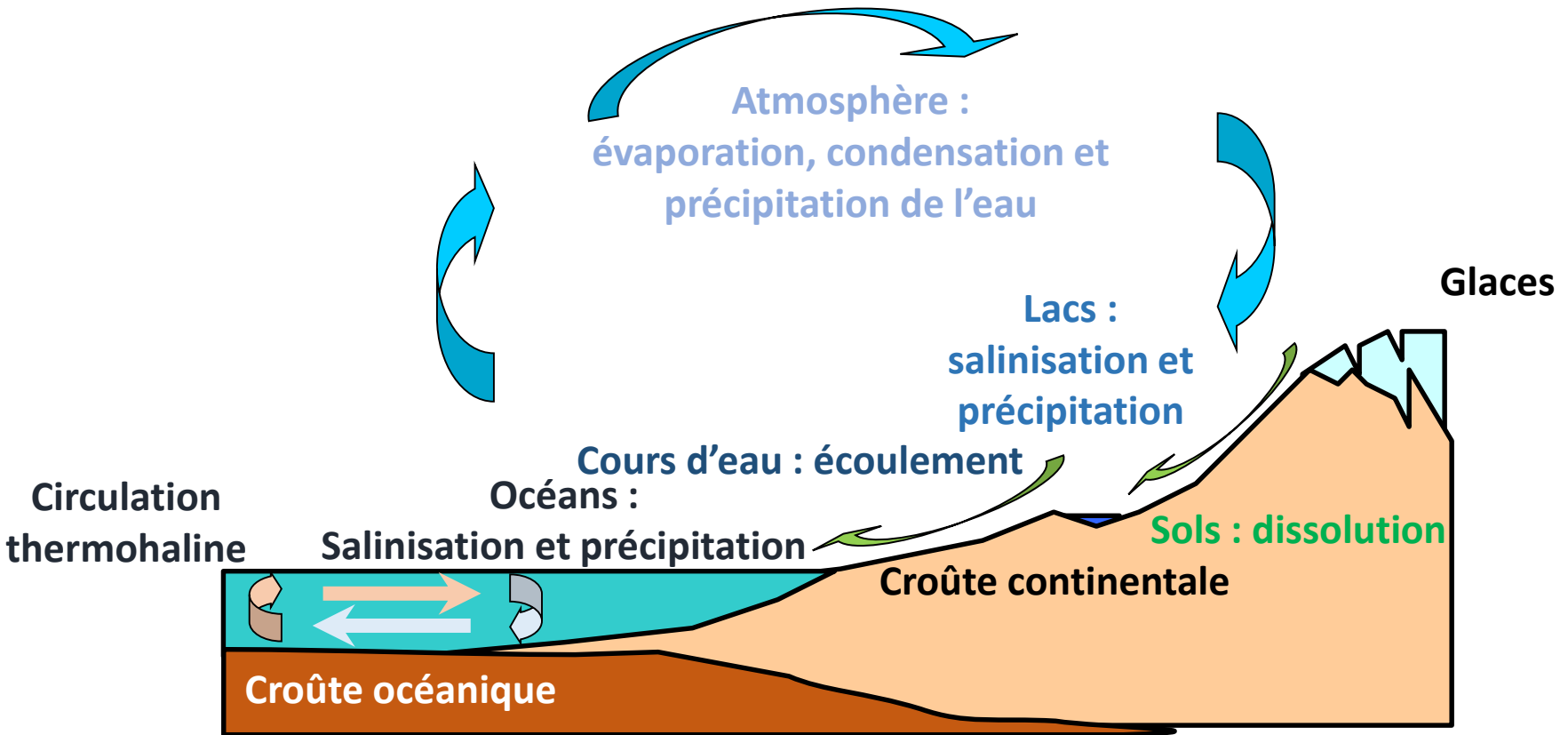


# Composition saline...

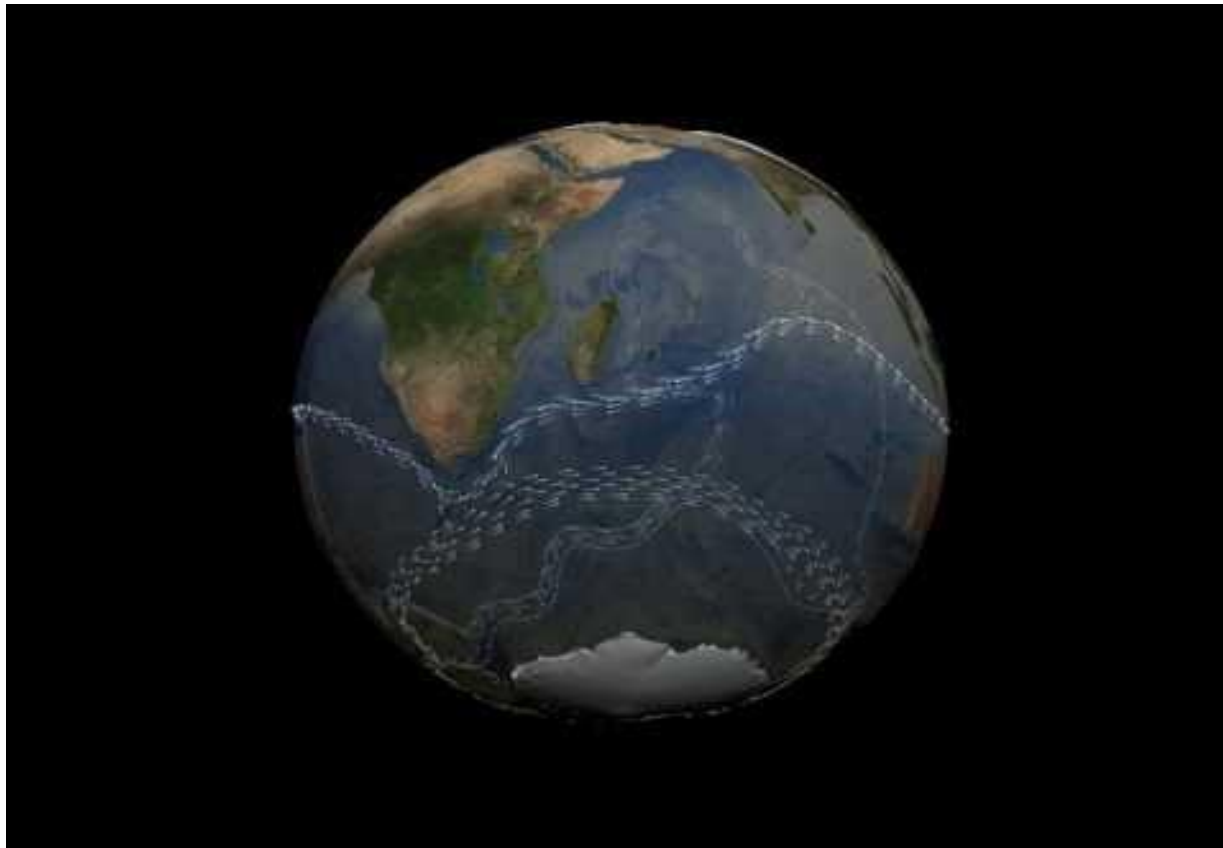
## Océans (Sels solubles)



# Une dynamique interne et externe...



# Circulation thermohaline...



<https://www.youtube.com/watch?v=1JSX5zjHWC8>



## 4 – L'ATMOSPHÈRE



# Des atomes, des gaz, des gouttelettes d'eau et des aérosols

*Un mélange de gaz stratifié*

**Vue de la troposphère (document Goodfon)**

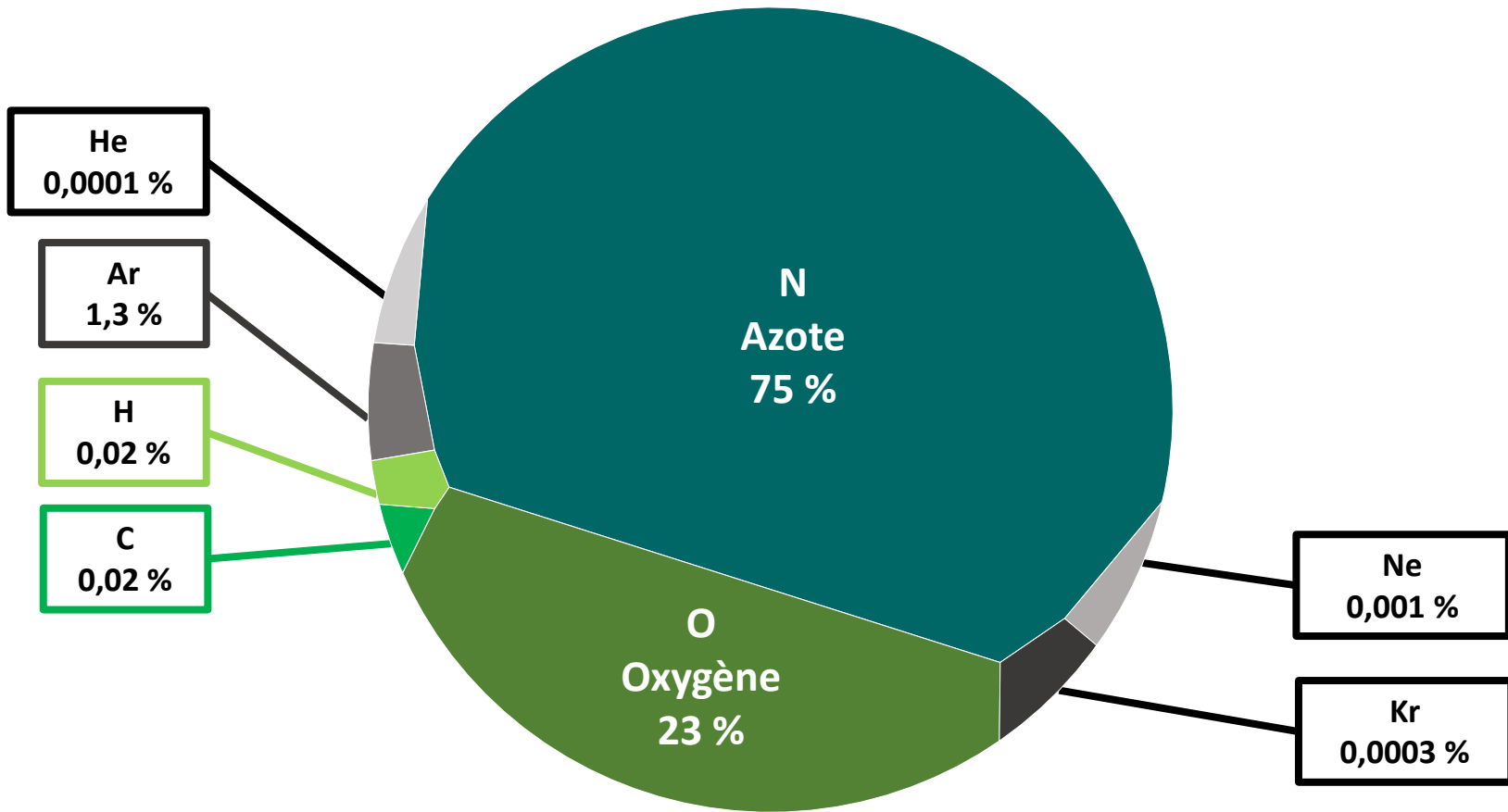


**Vue de l'espace (document IES Bisbal)**

*Avec une nature turbulente et hétérogène en teneur en eau dans la strate basale : la troposphère*

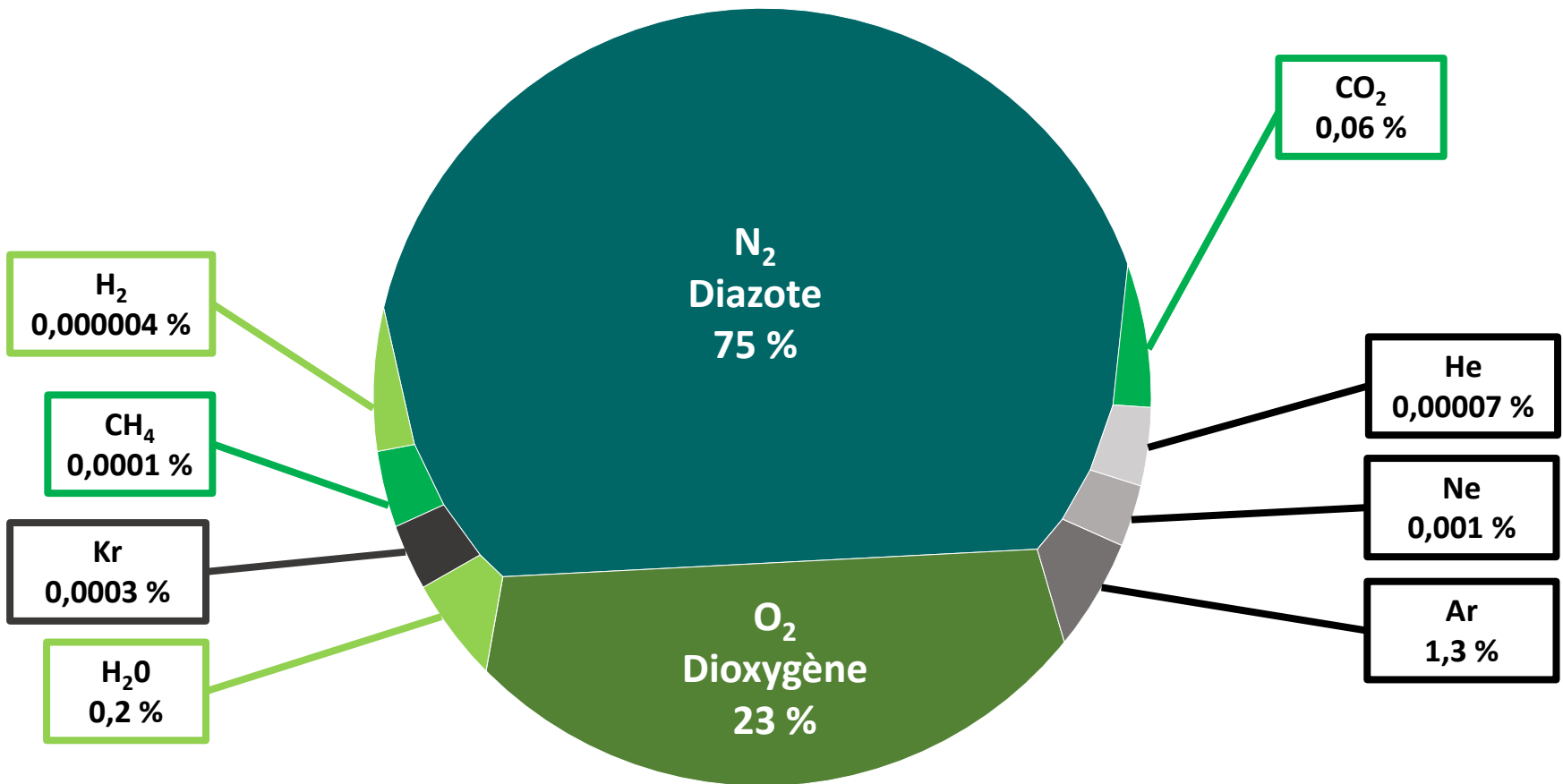
# Composition élémentaire...

## Atmosphère



# Composition gazeuse...

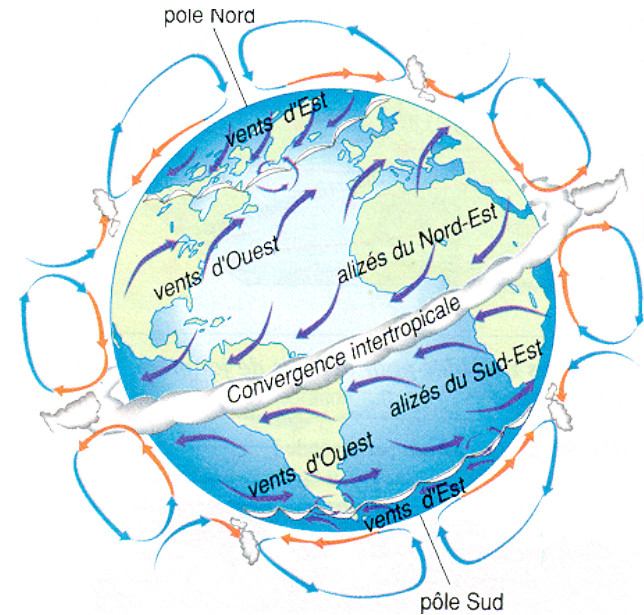
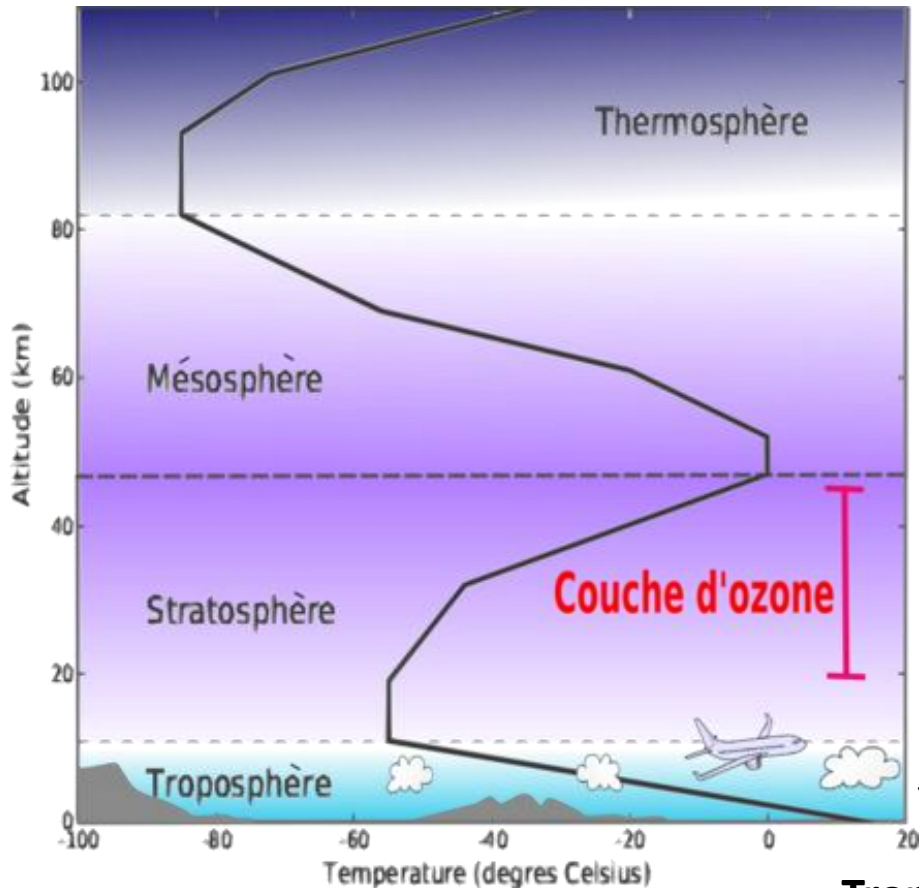
## Atmosphère



# Une structure thermique verticale et une troposphère agitée...

© Asaphon, GNU Free Documentation Licence

© <https://test.webedu.eduscol.education.fr/obter/applied/circula/theme/atmos32.htm>

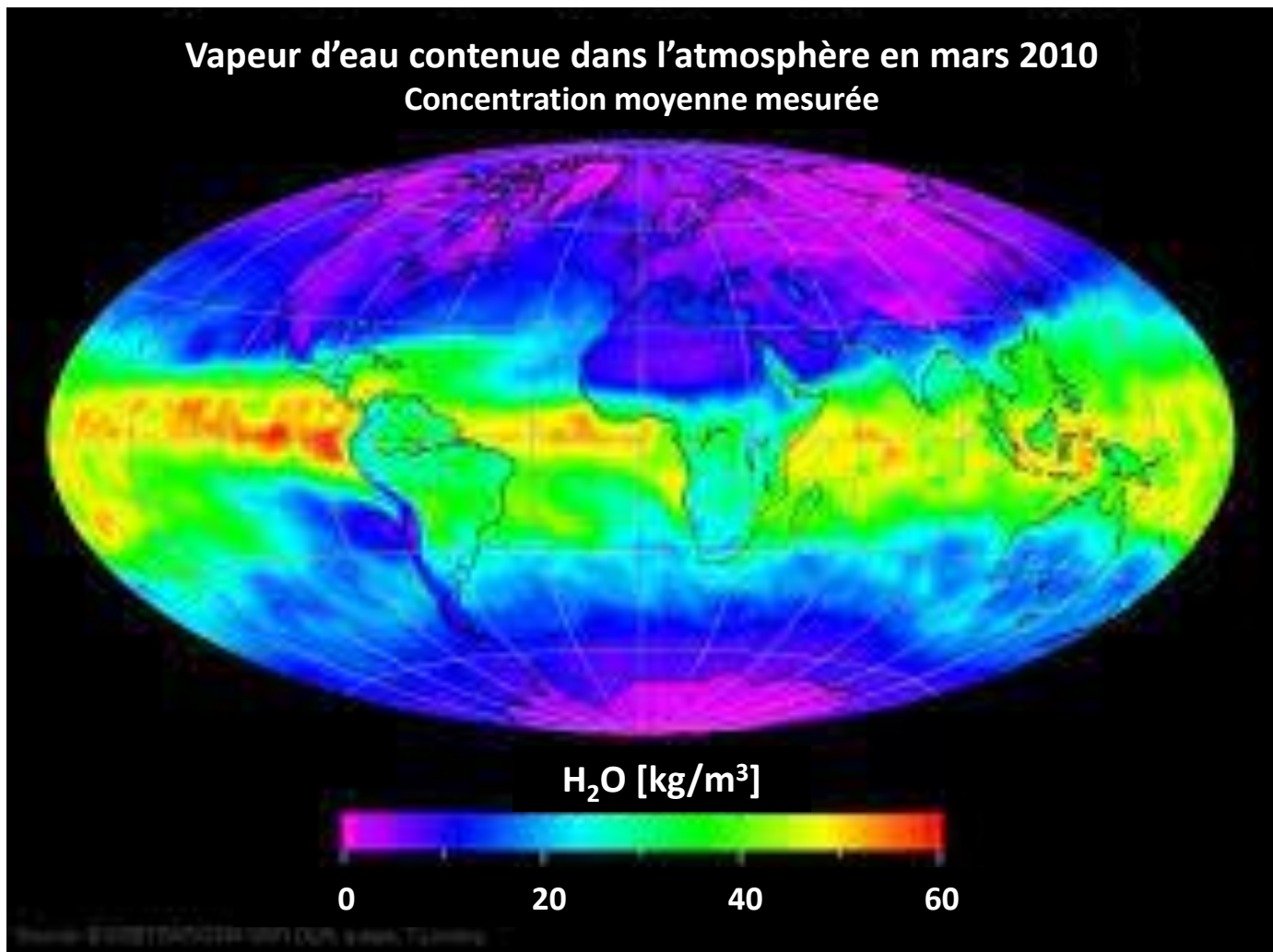


**Altitude**  
Entre 6 km vers les pôles  
et 14 km vers l'équateur

## Troposphère :

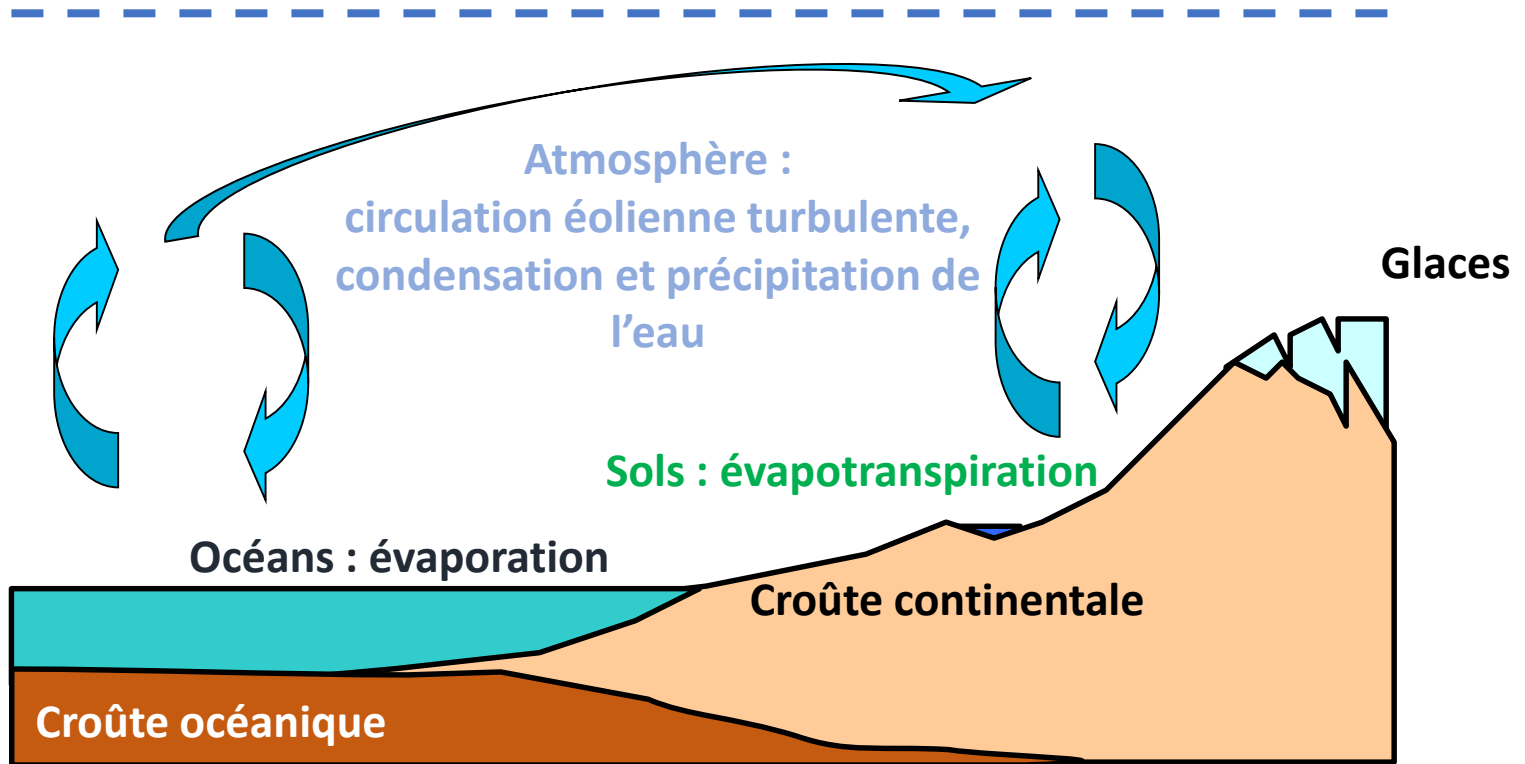
- Environ 80 % en masse de l'atmosphère
- Environ 99 % de l'eau atmosphérique et des aérosols
- Siège des phénomènes météorologiques

# Une teneur en eau très variable...



© document EUMETSAT/DLR German Space Agency, repris par le projet LUXORION  
<http://www.astrosurf.com/luxorion/meteo-eau.htm>

# Une dynamique troposphérique...





## 5 – LA BIOSPHÈRE

—



# Des atomes, des biomolécules, des êtres vivants, des écosystèmes...



**La forêt amazonienne, Brésil, © Neil Palmer/CIAT**    **La forêt boréale, Russie, © Vasiliy Tatarinov**

*Des plantes (82 %),  
des bactéries (13 %), et  
des champignons (2 %)*

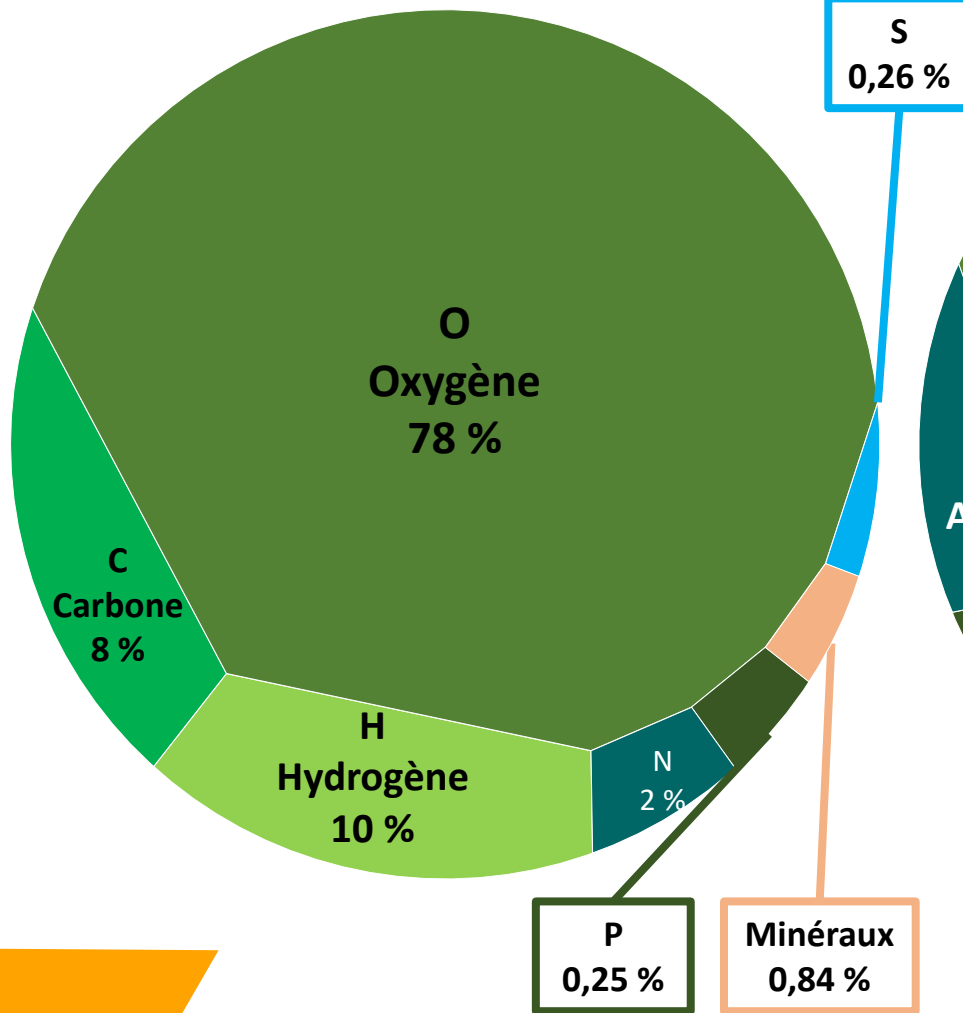


*Mais aussi  
des archées (1,5 %),  
des protistes (1 %),  
et des animaux (0,5 %)*

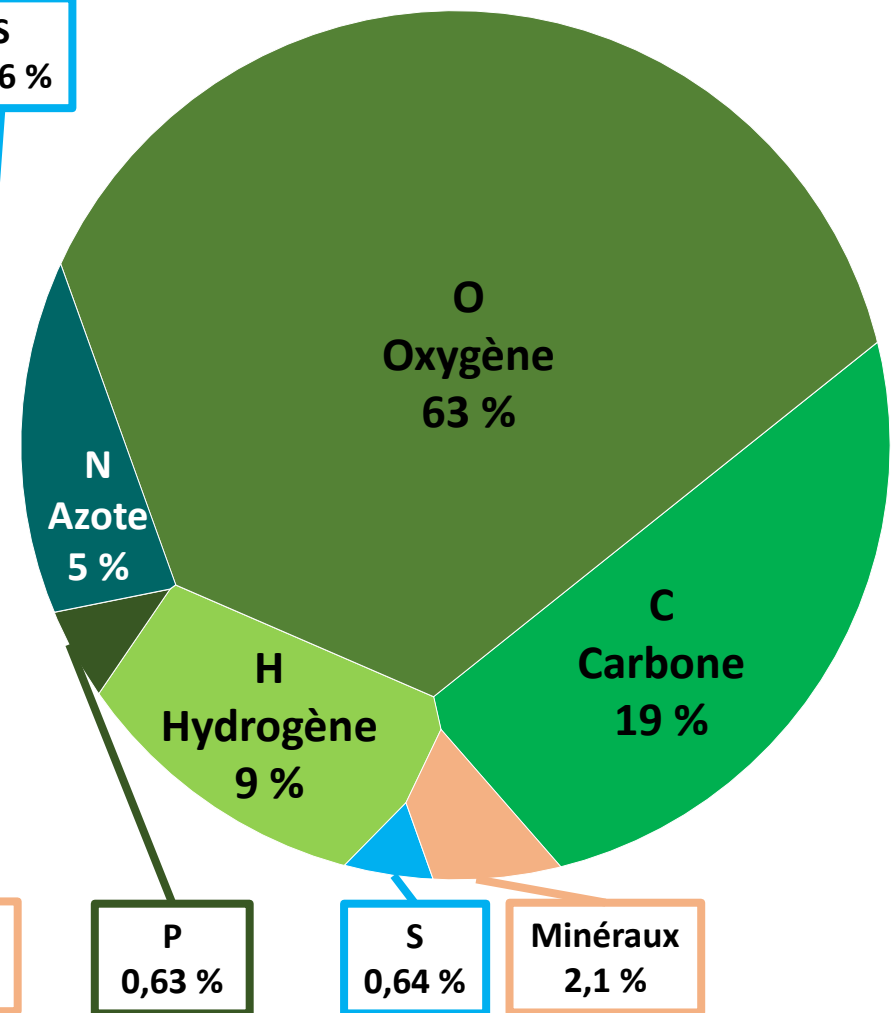
**La grande barrière de corail, Australie**  
© Commonwealth of Australia (GBRMPA)

# Composition élémentaire... d'un homme

Homme (Eau comprise)

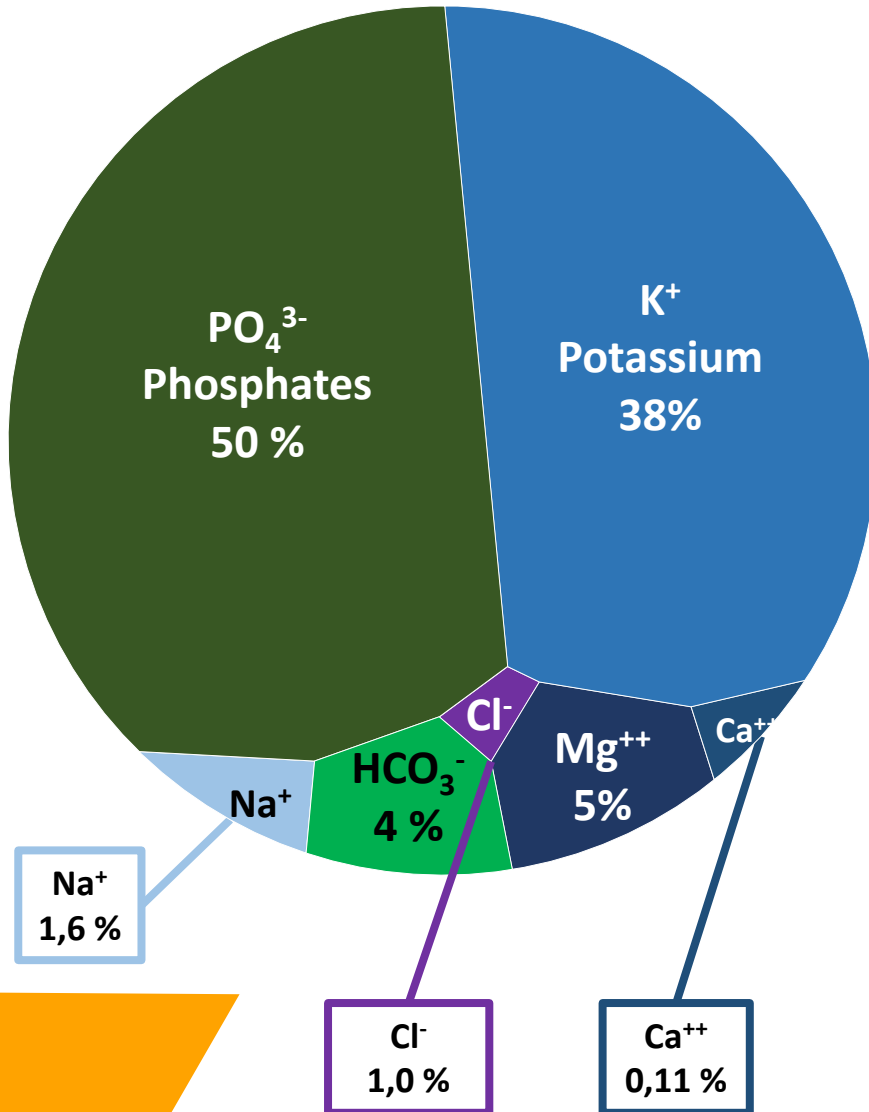


Homme (Sec !)

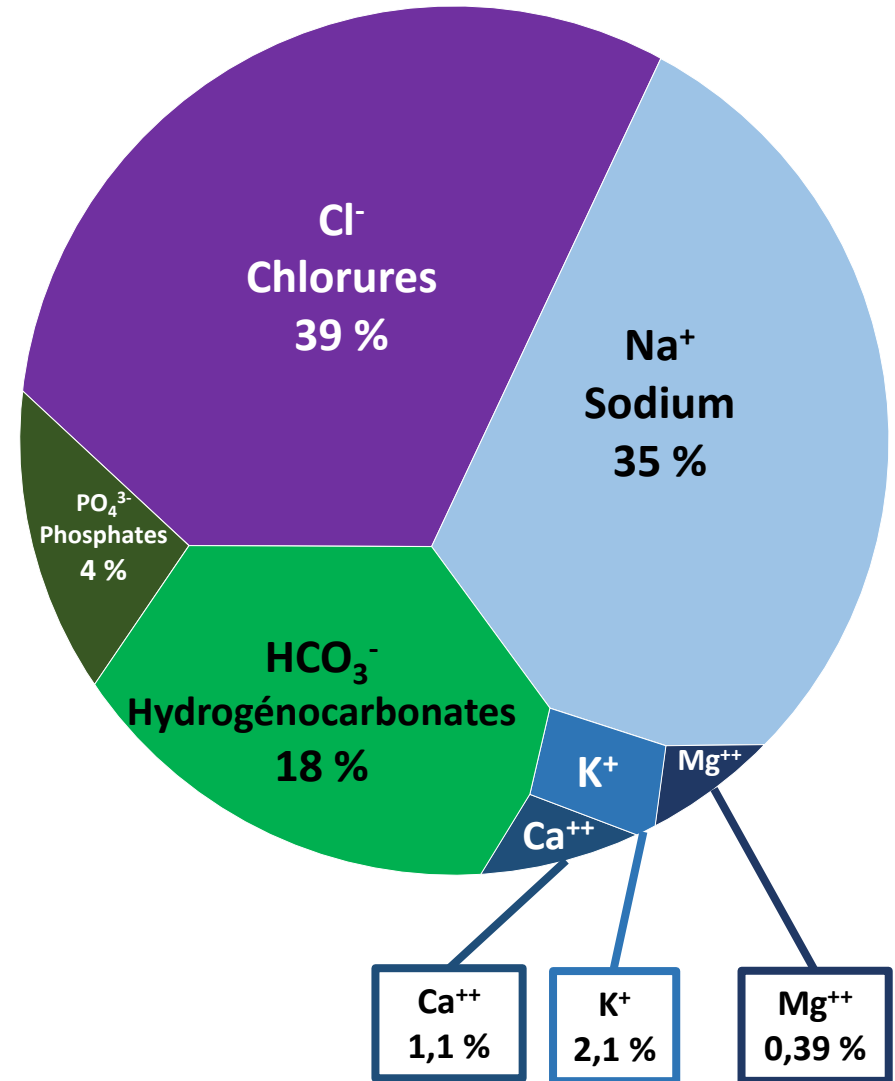


# Composition de l'eau vivante... humaine

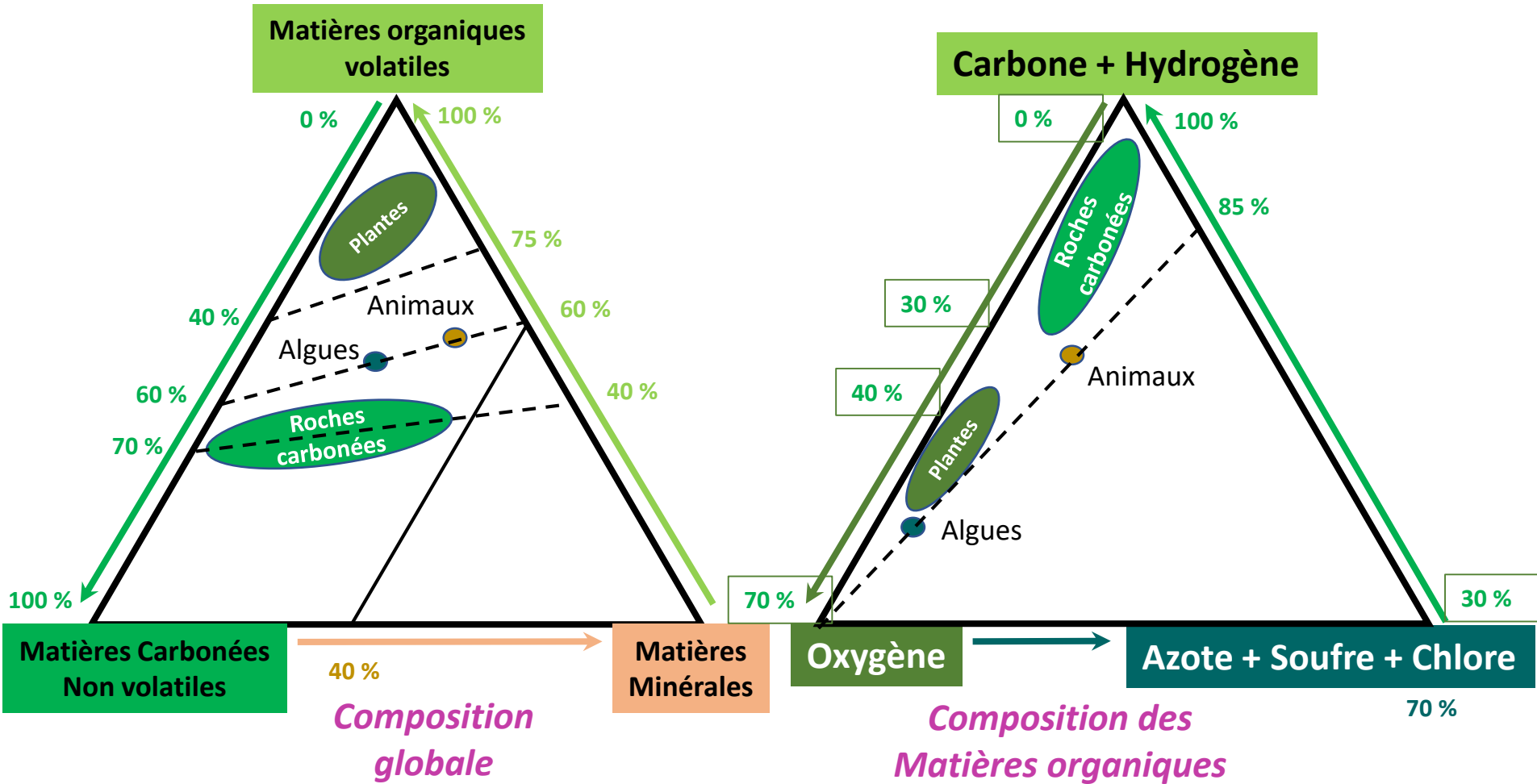
Cellules (Sels solubles)



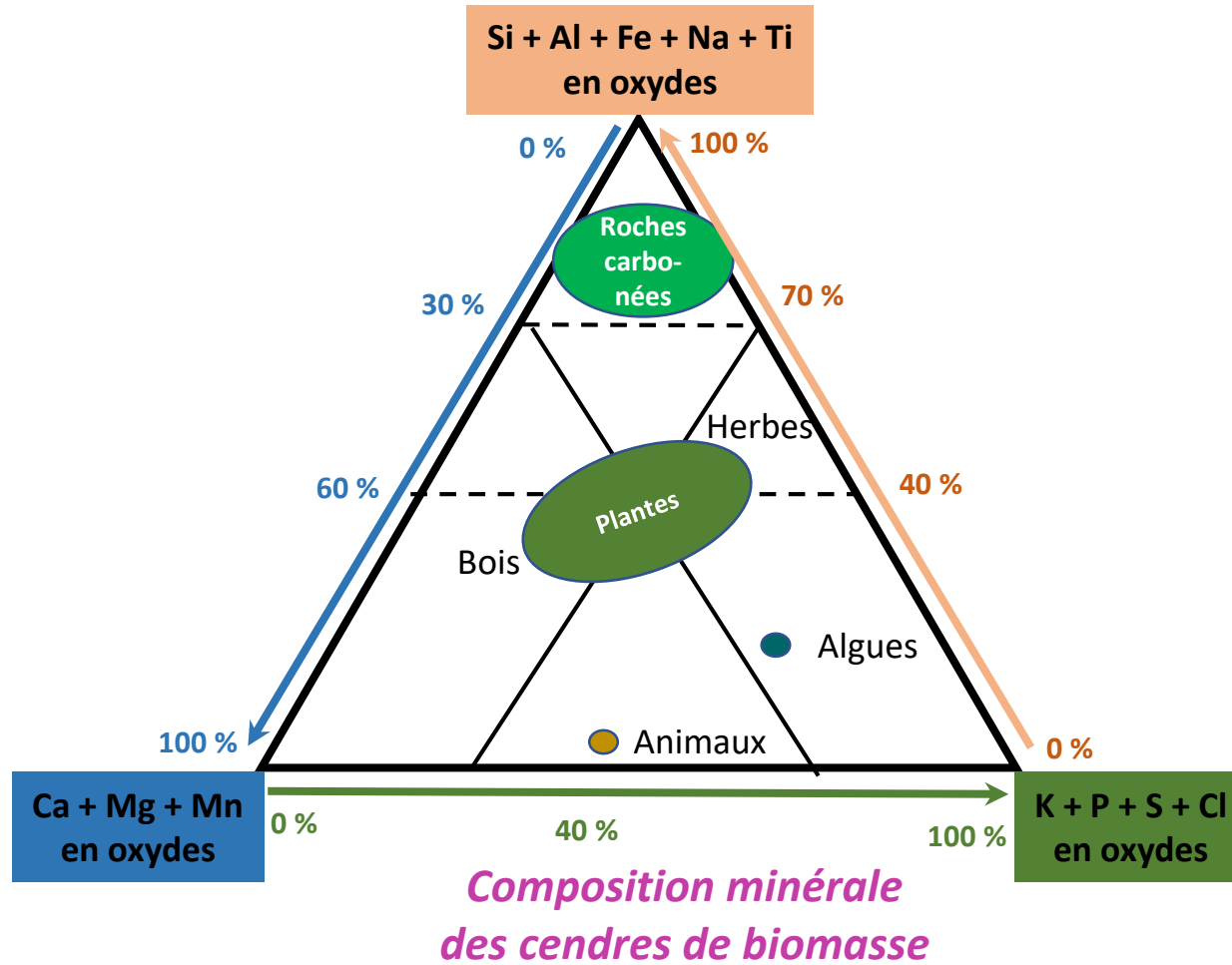
Lymphhe (Sels solubles)



# Variabilité de la biomasse (sèche)...



# Variabilité des cendres de biomasse...



# Une complexité moléculaire...

## **La biomasse « sucrée » :**

- $[CH_2O]_n$  : les glucides issus de la photosynthèse
  - Stockage énergétique primaire (glucose, amidon)  
environ 17 kJ/g
  - Structures du vivant (cellulose)

## **La biomasse « huileuse » :**

- $[CH_2]_n$  : les lipides issus de la transformation des glucides
  - Stockage énergétique secondaire (huiles et graisses, triglycérides)  
environ 38 kJ/g
  - Structures du vivant (parois cellulaires, phospholipides)

## **La biomasse « fonctionnelle » :**

- $[R_{AA}-CNH_2-CO]_n$  : les protéines issus d'une biosynthèse du vivant
  - Substances fonctionnelles (structures et processus biochimiques du vivant)
  - Polymères d'acides aminés au nombre de 22 radicaux azotés  $R_{AA}$
  - Liaison peptidique

# Des substances répliquables...


## Les substances biologiques « informationnelles » :

- $[R_B-[C_5H_7O_3]-HPO_3]_n$  (ADN)
- $[R_B-[C_5H_7O_4]-HPO_3]_n$  (ARN)

### les acides nucléiques, molécules répliquables et évolutives

- Substances génétiques (mémoire du vivant)
- Polymères de sucres (ribose ou désoxyribose) et de bases azotées au nombre de 5 (Adénine, Guanine, Thymine, Cytosine et Uracile)
- Liaison phosphorique et code de base  $4^3$  (64 possibilités) pour 22 acides aminés, et pour les signaux de début et fin pour chaque protéine.

## Les substances biologiques « énergétiques » :

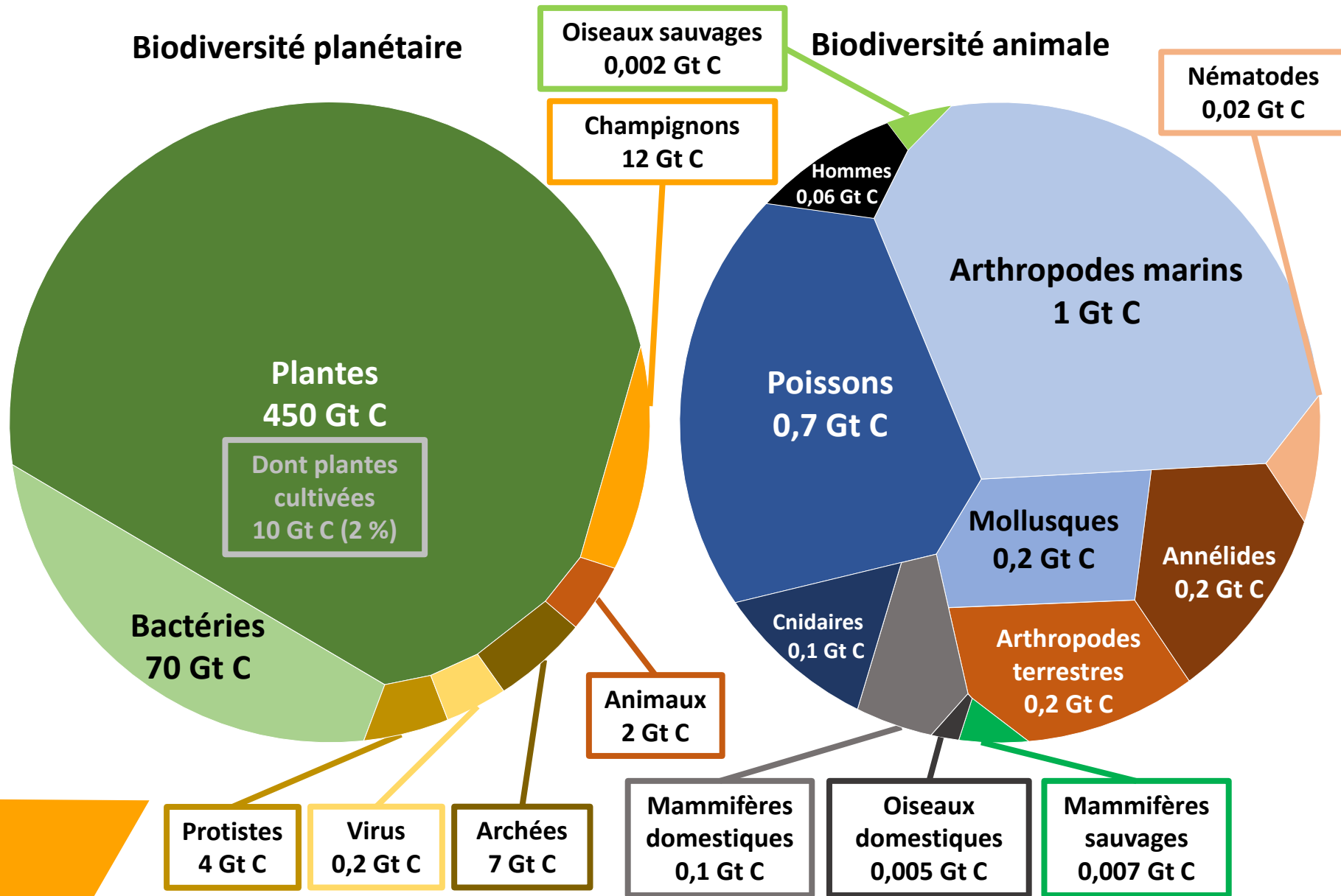
- $[[C_5N_5H_4]-[C_5H_6O_4]-[HPO_3]_3-H]$  (ATP)  environ 31 kJ/mol
- $[[C_5N_5H_4]-[C_5H_6O_4]-[HPO_3]_2-H]$  (ADP) environ 46 kJ/mol
- $[[C_5N_5H_4]-[C_5H_6O_4]-[HPO_3]_1-H]$  (AMP)

### les molécules d'adénosine phosphatée, transporteurs d'énergie

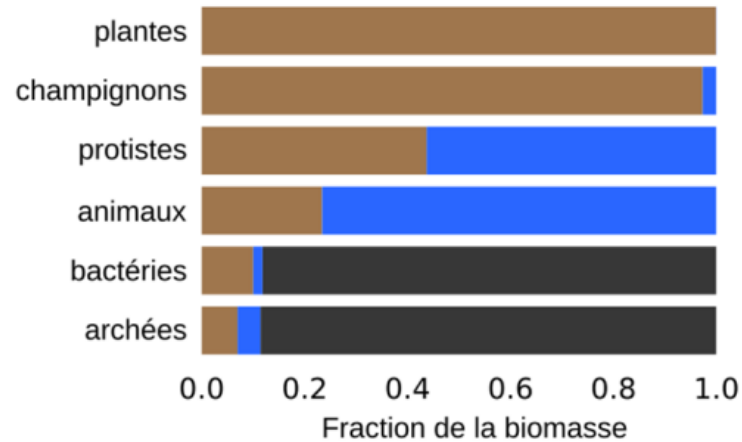
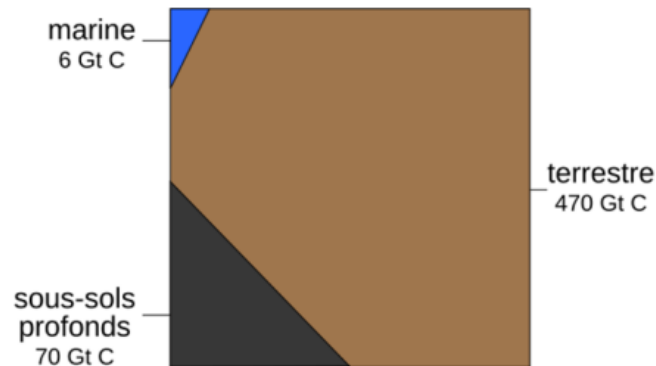
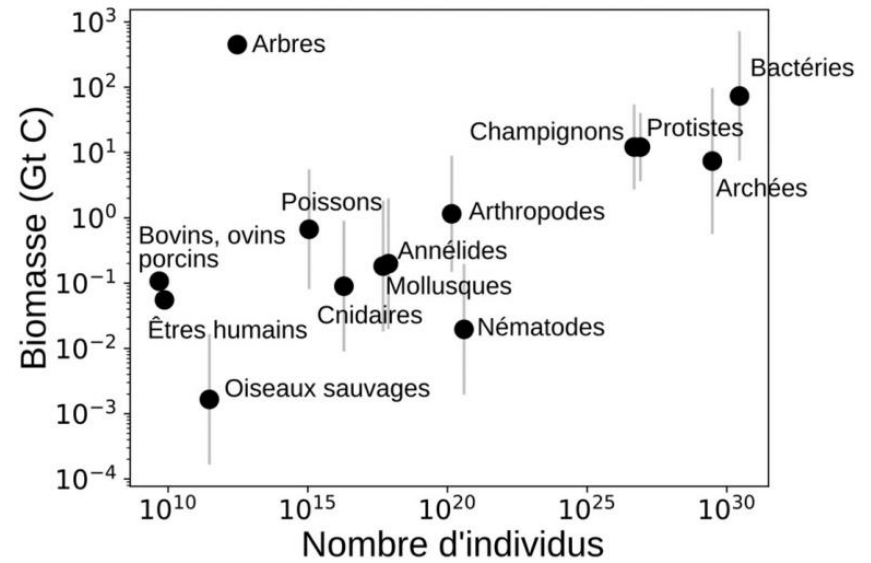
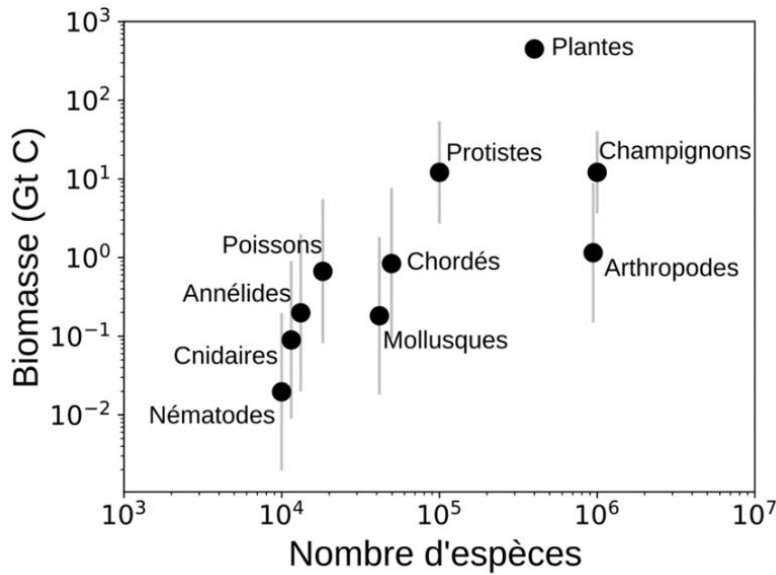
- Substances énergétiques
- Vecteur d'énergie chimique pour le métabolisme, la locomotion, la division cellulaire, ou encore le transport actif d'espèces chimiques à travers les membranes cellulaires et la transcription de l'ADN en ARN
- Liaison phosphorique

**Motrices du vivant...**

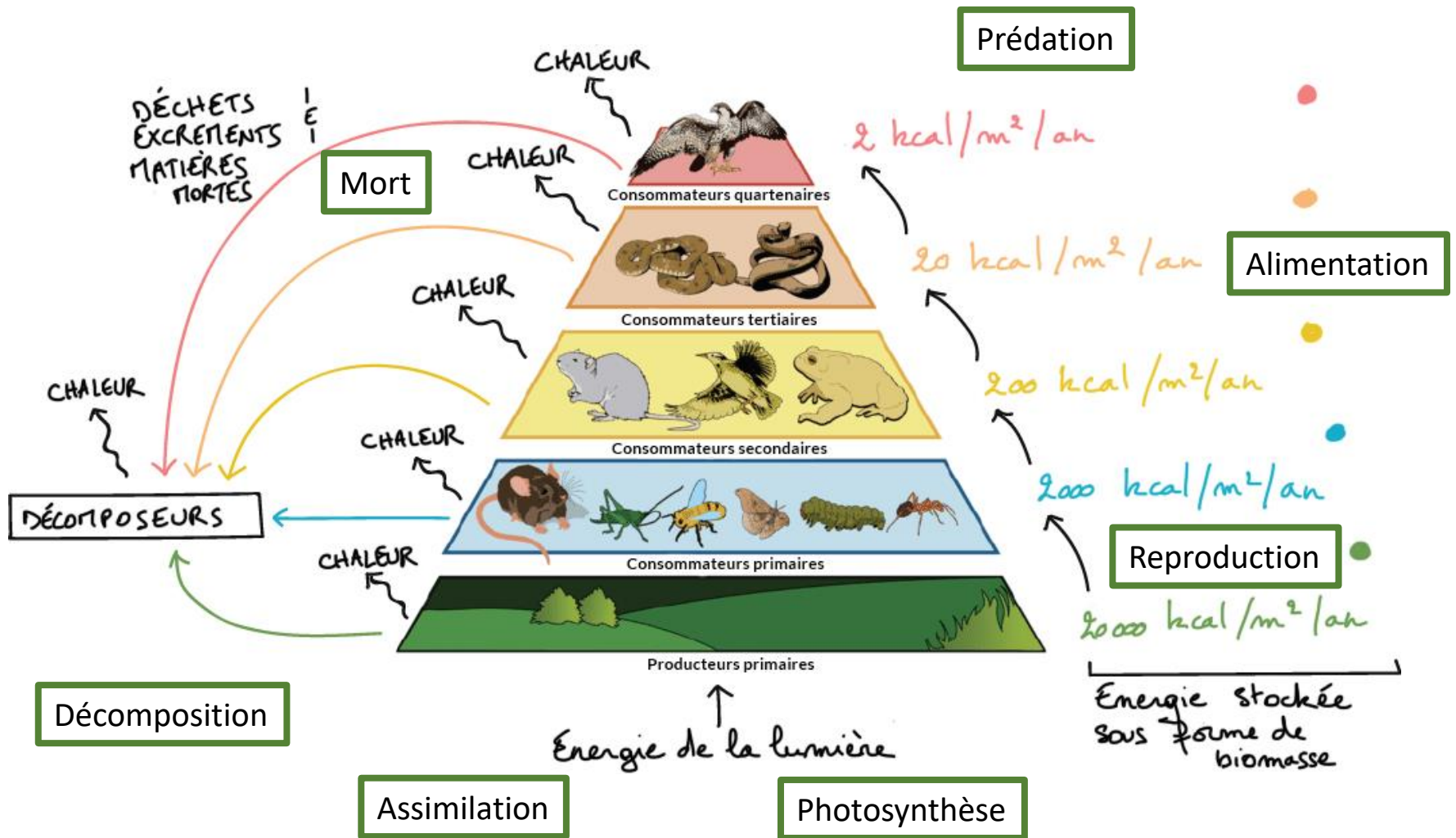
# Biodiversité planétaire en masse...



# Biodiversité : espèces et individus...



# Des cycles dynamiques dans des écosystèmes variés...



(170 W/m<sup>2</sup> => 5 000 000 kJ /m<sup>2</sup>/an => 1 300 000 kcal/m<sup>2</sup>/an dont 0,25 W/m<sup>2</sup> captés)

© image modifiée de "Ecological pyramid," par CK-12 Foundation, CC BY-NC 3.0. (1 kcal = 4,18 kJ)

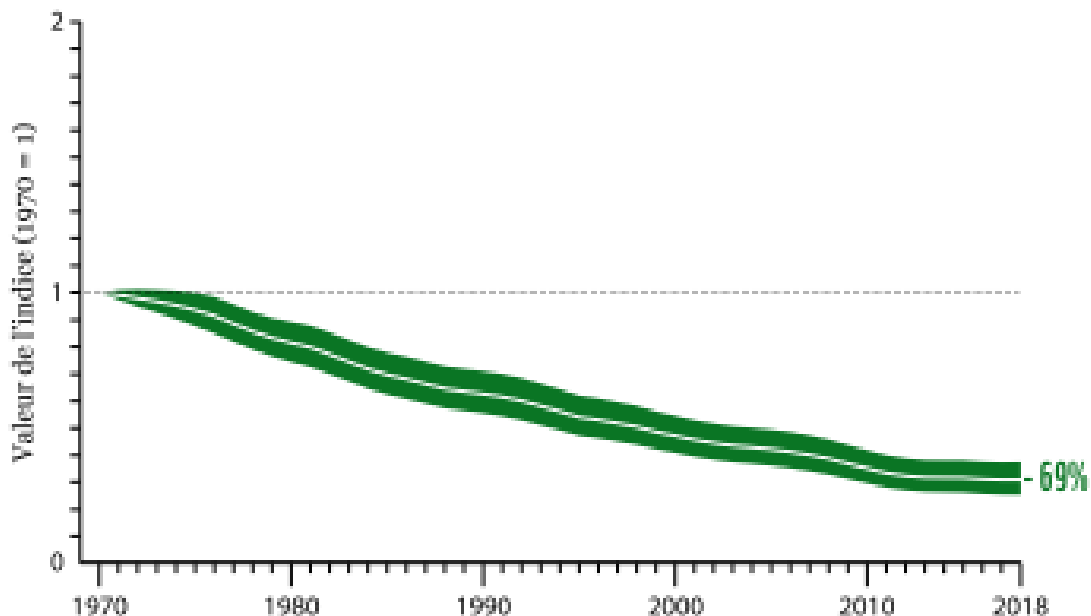
# Une biodiversité qui s'effondre !!! ... 6<sup>ème</sup> extinction en cours ?

## Figure 3 : L'indice Planète Vivante mondial de 1970 à 2018.

L'évolution moyenne de l'abondance relative de 31 821 populations représentant 5 230 espèces suivies dans le monde a diminué de 69 %. La ligne blanche indique les valeurs de l'indice et les zones colorées l'intervalle de confiance entourant la tendance (95 % d'intervalle de confiance, écart de 63 % à 75 %).  
Source : WWF/ZSL (2022)<sup>24</sup>.

### Légende

- Indice Planète Vivante Mondial
- Intervalle de confiance

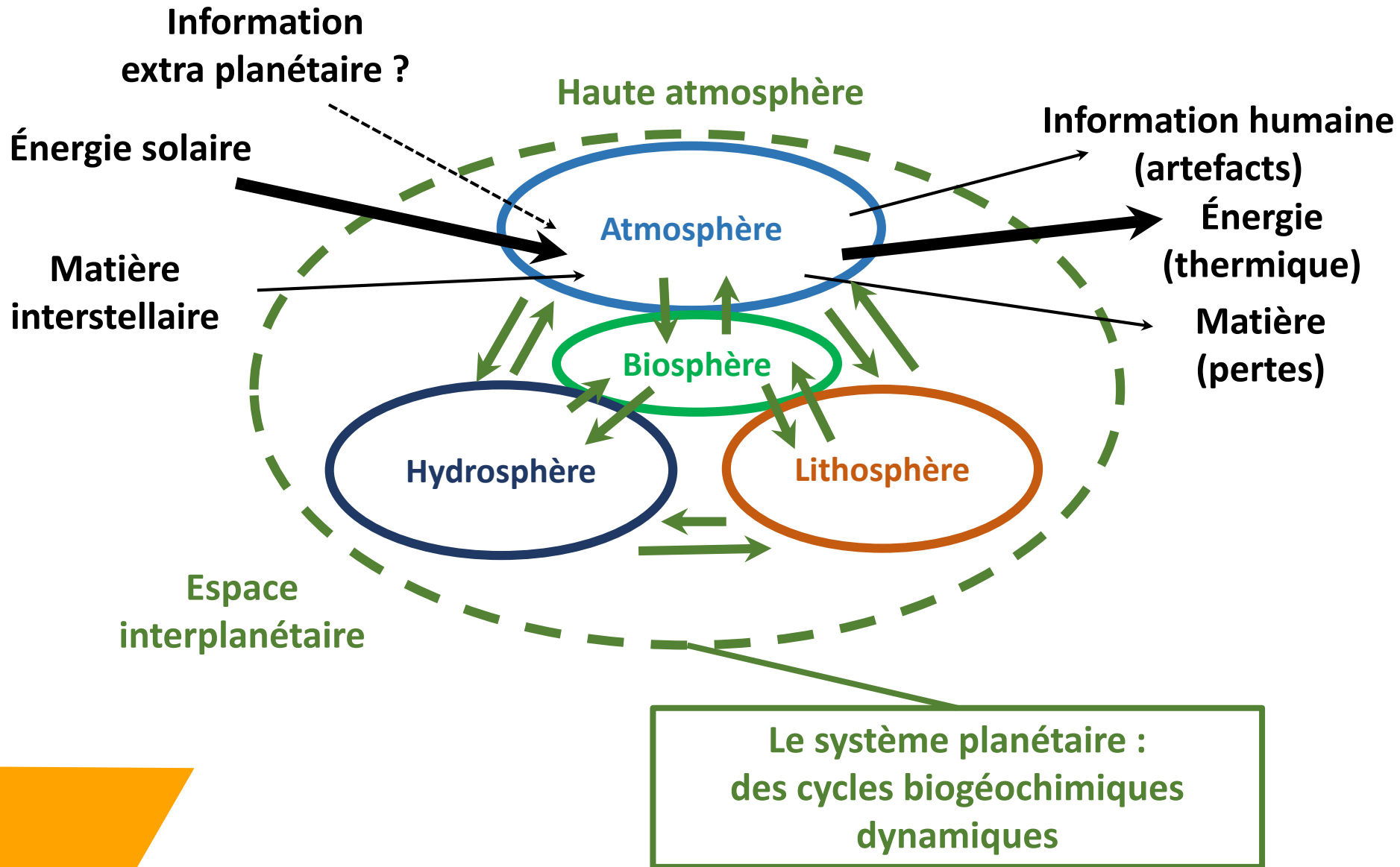




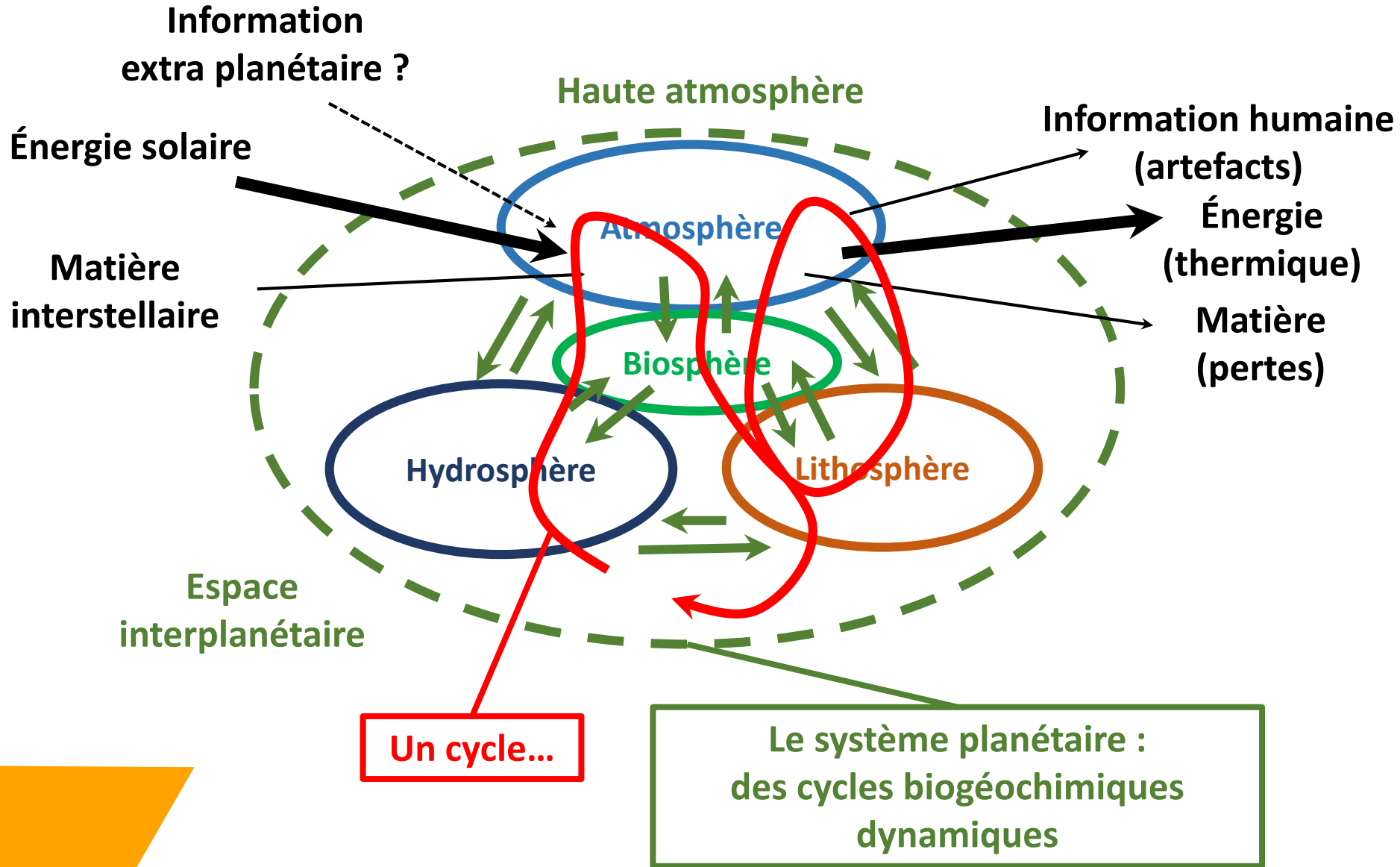
## 6 – DES CYCLES DYNAMIQUES

—

# Une schématisation globale :



# Une schématisation globale :



## De la lecture pédagogique :

- *Daniel DURAND*, 2017, ancien élève de l'ENA, « La systémique », Que Sais-je ?, Presses Universitaires de France, 13<sup>ème</sup> édition.
- *James LOVELOCK*, 2001, climatologue anglais, université de Manchester, « GAIA, une médecine pour la planète – Géophysiology, nouvelle science de la Terre », éditions Sang de la Terre, 2<sup>ème</sup> édition.
- *J.M. CARON, A. GAUTHIER, A. SCHAFF, J. ULYSSE et J. WOZNIAK*, 1998, enseignants-chercheurs et enseignants de l'université Claude Bernard Lyon I et de 3 lycées, « Comprendre et enseigner la planète Terre », éditions Ophrys. 3<sup>ème</sup> édition.
- *Jacques-Henry WEIL*, 2020, biochimiste, université Louis Pasteur de Strasbourg, « Biochimie générale », éditions MASSON, 11<sup>ème</sup> édition.
- *Tristan GUILLEVIN*, LADATAVIZ, Data Visualisation Freelance, réalisation des schémas circulaires de Voronoï.

(<https://www.ladataviz.com/tools/advviz/voronoi>)





[ARTSETMETIERS.FR](http://ARTSETMETIERS.FR)