

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur et de La Recherche
Scientifique
Université de Saida– Dr. Moulay Tahar
Faculté des Sciences, Département De Biologie



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **Diplôme** de

MASTER en Biologie

Présentée par :

M^{elle} MOHAMMEDI SIHAM

M^{elle} ABDELLAOUI SARA

Spécialité : protection des écosystèmes

Spécialité : microbiologie appliqué

Filière : Ecologie et environnement

Filière : Science biologique

Intitulé

**Recherche bibliographique sur l'effet
des microorganismes -bactéries- au
changement climatique**

Soutenu, le 13/07/2021.

Devant le jury composé de :

Président : Dr Terras Mohammed

Univ. Dr Tahar Moulay-Saida

Examineur : Dr Chalane Fatiha

Univ. Dr Tahar Moulay-Saida

Encadreur : Dr Ammam Abdelkader

Univ. Dr Tahar Moulay-Saida

Année universitaire : 2020/2021

Remerciement

On remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

*Tous d'abord ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide de l'encadrement de **Mr Ammam Abdelkader**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire malgré leur charge académique et professionnelle.*

*Nos remerciement s'adressent aussi au nos professeurs membres jury **Dr Terras Mohammed, Dr Chalane Fatiha**.*

Je remercie sincèrement a tous mes enseignants durant tous les années d'étude pour leurs générosité.

*Je tien par la même à remercie ma cher sœur **Halima** pour son inestimable aide et soutien.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :
Mes parents et ma grande famille,
Mes sœurs mes frères
A la personne qui m'a donné sa vie et m'a
soutenu tout le temps et en toutes
circonstances « je t'aime maman »
A Mon amis Dalila,
Enfin à tous qui ont participé de près ou de
loin pour
L'accomplissement de ce modeste travail...

Table des matières :

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	

Introduction générale

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : le monde microbien

I. Introduction	2
II. Histoire des microorganismes.....	2
III. Définition des microorganismes.....	3
IV. Les Catégories de microbes.....	4
IV.1. Les bactéries.....	4
IV.2. Les virus	4
IV.3. Les protozoaires et les champignons.....	4
V. Classification des microorganismes.....	5
VI. Structure.....	6
VII. Reproduction.....	6
VIII. Métabolisme.....	6
IX. Ecologie.....	6
IX.1. Dans les mers et les océans.....	6
IX.2. Dans le sol.....	6
IX.3. Le long de l'appareil digestif des animaux.....	7
X. La diversité de la physiologie des micro-organismes.....	7
X.1. Les chimio-organotrophes.....	7
X.2. Les chimiolithotrophes.....	8
X.3. Les phototrophes.....	8
X.4. Les hétérotrophes et les autotrophes.....	9
XI. La diversité des procaryotes.....	10
XI.1. Les Bactéries.....	10
XI.2. <i>les archées</i>	14
XII. La diversité des eucaryotes.....	15
XIII. L'importance de vie microbienne.....	18

Chapitre II : les bactéries

I. Définition des bactéries.....	19
II. les morphologies bactériennes.....	19
II.1.La forme bactérienne.....	19
II.2.La Taille bactérienne.....	20
II.3.Les associations cellulaires.....	20
III. La structure des bactéries.....	21
III.1.L'appareil nucléaire des bactéries.....	21
III.1.1.L'ADN extra-chromosomique.....	21
III.2.Le cytoplasme bactérien	22
III.3. La membrane cytoplasmique (membrane interne).....	22
III.4.La paroi bactérienne.....	22
III.5.Structures inconstantes.....	23
III.5.1.La capsule.....	23
III.5.2.Les cils ou flagelles.....	23
III.5.3.Les pili ou fimbriae.....	23
III.5.4.Les spores.....	24
III.5.5.Le glycocalyx.....	24
IV. Classification des bactéries	25
V. Différents bactéries gram et sa coloration.....	28
V.1. La coloration de gram.....	28
V.2. Principaux constituants chimiques de la paroi.....	28
V.3. Structure moléculaire de la paroi des grams négatifs et positifs.....	29
V.3.1. Paroi de gram positif.....	29
V.3.2. Paroi de gram négatif	30
VI. Les taxonomies bactériennes	30
VI.1. Intérêt d'une taxonomie bactérienne.	30
VI.2. Caractères utilisés pour la classification des bactéries.....	31
VI.2.1 Nom des bactéries une bactéries est définie par.....	32
VI.2.2 Méthodologie.....	32
VI.2.3 Classification phénotypique simple	33
VI.2.4 Classification phénotypique complexe	33
VI.2.5 Classification phénotypique, chimiotaxonomie.....	33
VI.2.6 Taxonomie génomique.....	33
VI.2.7 Hybridation ADN/ADN.....	34
VII. La vie bactérienne.....	34

VII.1. Mode de vie des bactéries : le biofilm.....	34
VII.2. La capacité de vivre dans des conditions très différentes.....	36
Chapitre III : le climat	
I. Introduction.	38
II. Définition de climat.	38
III. Les climats du passé.....	38
IV. Les différents types des climats au monde.....	39
IV.1.Le climat tropical.....	39
IV.2. Le climat Subtropical.....	39
IV.3.Le climat Equatorial.....	40
IV.4.Le climat Aride.....	40
IV.5.Le climat Semi-aride.....	40
IV.6.Le climat Méditerranéen.....	40
IV.7.Le climat océanique	40
IV.8.Le climat Tempéré.....	40
IV.9.Le climat Continental.....	41
IV.10.Le climat montagnard.....	41
IV.11.Le climat Polaire	41
V.Les Facteurs climatiques	42
V.1.Les Facteurs énergétiques	42
V.1.1.Rayonnement solaire	42
V.1.1.a. Absorption du rayonnement	42
V.1.1.b. Diffusion du rayonnement.....	42
V.1.1.c. Réflexion du rayonnement	42
V.1.2. Le facteur lumière (éclairage).....	43
V.1.3. Température.....	43
V.1.4. Pression.....	44
V.2. Facteurs hydrologiques.....	45
V.2.1. Précipitations	45
V.2.2. Hygrométrie :(L'humidité).....	47
V.3. Facteurs mécaniques	48
V.3.1. Mouvement d'aire : (Le vent).....	48
VI. Eléments du système climatique	49
VI.1. L'atmosphère	49
VI.2. Les océans	51
VI.3. La biosphère.....	51

VI.4. La lithosphère.....	52
VI.5. La cryosphère.....	52
VII. Classification du climat.....	53
VII.1. Classifications empiriques	53
VII.2. Classifications génétiques.....	54
VIII . Fonctionnement du Système climatique.....	55
IX. Question de changement climatique.....	56
X. Causes du changement climatique	56
XI. Modification du climat par l’homme	58
XII. Les conséquences du changement climatiques.....	58
XII.1. Sur la couche d’ozone	59
XII.2. Sur la faune.....	59
XII.3. Sur La flore.....	59
XII.4. Niveau de mer.....	59
XII.5. L’acidification des océans.....	60
XII.6. L’effet sur la santé.....	60

Chapitre IV : microorganismes et changement climatique

I. Les effets des microorganismes marins sur le changement climatique dans les biomes marins.....	61
I. 1. Le phytoplancton marin.....	61
I.2 Les archées et les bactéries chimio-litho-autotrophes.....	62
I.3. Les virus marins, les bactéries et les herbivores eucaryotes	62
I.4. Les habitats côtiers végétalisés	63
II. L’effet du changement climatique sur les microorganismes dans les biomes marins	63
II.1. La productivité primaire du phytoplancton.....	64
II.2. La sédimentation des matières organiques particulières.....	64
II.3. La latitude et les courants océaniques influent sur la distribution et la diversité des organismes marins.....	64
II.4 Conséquences d’élévation des températures sur les microorganismes.....	65
II.4.1 Les gradients thermiques font varier la distribution et la diversité des organismes marins....	65
II.4.2. La sensibilité aux pathogènes peut dépendre de la température.....	65
II.4.3. La concentration des ribosomes cellulaires chez le phytoplancton eucaryote Diminue en cas de températures élevées.....	65
II.5. L’élévation des niveaux de CO ₂	66
II.6. L’acidification des océans.....	66
III. Les effets des microorganismes sur le climat varient dans les biomes terrestres	67

III.1. Les effets des microorganismes au niveau des sols	67
III.2. Les effets des microorganismes au niveau des plantes.....	67
III.3. Les effets des microorganismes au niveau des forêts.....	68
III.4. Les effets des microorganismes au niveau des prairies.....	68
III.5. Les effets des microorganismes au niveau des lacs.....	69
III.6. Les effets des microorganismes au niveau des tourbières.....	69
III.7. Les effets des microorganismes dans le pergélisol	69
III.8. Les effets des microorganismes concernant les herbivores invertébrés et mammifères.....	70
III.9. Les effets des microorganismes concernant les détritivores.....	70
IV. Les effets du changement climatique sur les microorganismes dans les biomes terrestres.....	71
IV.1. L'influence du changement climatique sur la structure et la diversité des communautés microbiennes ainsi que leurs fonctions.....	71
IV.1.a. Dans les sols forestiers.....	72
IV.1.b. Dans les sols désertiques.....	72
IV.1.c. Dans des sites prairies tempérées	72
IV.1.d. Dans la toundra	72
IV.1.e. Le réchauffement rapide de la péninsule antarctique et de ses îles.....	72
IV.2. Les réponses de la respiration microbienne aux changements de température.....	73
IV.3. Les réponses de la croissance microbienne aux changements de température.....	73
IV.4. Le changement climatique est susceptible d'augmenter la fréquence, l'intensité et la durée des proliférations de cyanobactéries.....	74
V. Les effets des microorganismes sur le changement climatique dans les biomes agricoles	75
V.1. Production de méthane.....	75
V.2. Emissions de N ₂ O, un puissant gaz à effet de serre.....	76
VI. Les effets du changement climatique sur les microorganismes.....	76
VI.1. L'augmentation des températures et de la sécheresse.....	76
VI.2. L'aridité.....	77
VI.3. Les effets combinés du changement climatique et de l'eutrophisation causés par les engrais.....	77
VII. L'atténuation du changement climatique par les microorganismes.....	77
VIII. Un nouveau type de bactérie lutte contre le changement climatique et les polluants du sol.....	78
VIII.1. Les bactéries qui pourraient lutter contre les polluants du sol	78
VIII.2. Les bactéries qui pourraient lutter contre le changement climatique.....	81
Conclusion.....	82
Références bibliographiques	

Résumé :

Ce travail a été consacré à l'étude de l'importance et du rôle des microbes et bactéries notamment dans l'influence du climat.

Le monde microbien est d'une grande importance, car il est une composante importante des cycles du carbone et de l'azote et participe à l'émission et à l'élimination des gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone et le méthane, qui sont à leur tour responsables du changement climatique.

Les microbes de la photosynthèse consomment le dioxyde de carbone atmosphérique tandis que les hétérotrophes décomposent la matière organique pour émettre des gaz à effet de serre.

L'équilibre entre les deux processus est un déterminant majeur du flux net de carbone, qui varie d'un écosystème à l'autre en fonction des conditions climatiques telles que la température ; Cela fait de la réponse microbienne une composante importante du flux de carbone sur Terre, car non seulement elle piège mais libère également d'énormes quantités de carbone. Ainsi, les gaz à effet de serre proviennent souvent des microbes sont ce qui les rend une cause importante du changement climatique.

Les mots clés : bactéries, changement climatique, effet de serre, microbes.

ملخص :

كرس هذا العمل من اجل دراسة أهمية ودور الميكروبات والبكتيريا بصفة خاصة في التأثير على المناخ. يحمل العالم الميكروبي أهمية كبيرة ، حيث انه مكون مهم في دورات الكربون والنيتروجين ويشارك في انبعاث وإزالة غازات الدفيئة مثل ثاني أكسيد الكربون والميثان والتي بدورها مسؤولة عن تغيير المناخ. تستهلك ميكروبات التركيب الضوئي ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي في حي أن الكائنات غيرية التغذية تحلل المواد العضوية لتنبعث منها غازات الدفيئة . التوازن بين العمليتين هو المحدد الرئيسي لتدفق الكربون الصافي والذي يختلف عبر النظم البيئية المختلفة اعتمادا على الظروف المناخية مثل درجة الحرارة ما يجعل الاستجابة الميكروبية مكونا مهما لتدفق الكربون على الأرض لأنها لا تحبس فحسب بل تطلق أيضا كميات هائلة من الكربون بالتالي فان غازات الدفيئة تنشأ غالبا من الميكروبات ما يجعلها مسببا هاما للتغيرات التي تطرأ على المناخ.

الكلمات المفتاحية : ، البكتيريا ، تغير مناخ، احتباس حراري، الميكروبات.

Abstract:

This work was devoted to the study of the importance and the role of microbes and bacteria, in particular in the influence of the climate.

The microbial world is of great importance, as it is an important component of the carbon and nitrogen cycles and participates in the emission and elimination of greenhouse gases such as carbon dioxide and methane, which in turn is responsible for climate change.

Photosynthetic microbes consume atmospheric carbon dioxide while heterotrophs break down organic matter to emit greenhouse gases.

The balance between the two processes is a major determinant of net carbon flow, which varies across different ecosystems depending on climatic conditions such as temperature. This makes the microbial response an important component of carbon flow on Earth because it not only traps but also releases huge amounts of carbon. Thus, greenhouse gases often arise from Microbes are what makes them an important cause of changes in climate

Keywords : bacteria, climate change, greenhouse effect, microbes.

Liste des figures

figure n°	titre des figures	page n°
01	Microscope de Van Leeuwenhoek	02
02	Robert Koch (1843_1910)	03
03	Louis Pasteur	03
04	Des Bactéries <i>Escherichia-coli</i> grossies 10.000 fois	03
05	Différente options métaboliques pour l'obtention d'énergie	08
06	Protéobactéries phototrophe	09
07	Chimiolithotrophe	09
08	Arbre phylogénique universel du vivant défini à partir des comparison de séquences du gène d'ARN	10
09	Arbre phylogénique détaillé des Bactéria	11
10	Morphologie stypique de la bactérie <i>pédonculée planctomyces</i>	12
11	Spirochètes	12
12	Bactéries verte sulfureuses (<i>chlorobuim</i>)	12
13	Bactéries vertes non sulfureuses (<i>chloroflexus</i>)	12
14	<i>Dinococcus radiodurans</i>	13
15	<i>Aquifex</i>	13
16	Arbres phylogénétiques détaillés du domaine des archaea	14
17	<i>Pyrolobus</i>	15
18	Procaryotes acidophiles extremes (<i>Thermoplasma</i>)	16
19	Arbre phylogénétique détaillé du domaine des Eukarya	17
20	Algue verte de structure coloniale Vlvox	17
21	Champignons de structure sporulantes typiques d'une moisissure	17
22	Protozoaire (<i>cilié paramecium</i>)	18
23	Lichens (sur un rocher, et sur une souche d'arbre mort)	18
24	Formes et modes d'association de quelques cellules bactériennes	20
25	Schéma d'une cellule bactérienne	24
26	Dessin schématique du peptidoglycane	28
27	Organisation du térapeptide et du pentapeptide a) Gram -, b) Gram +	29
28	Structure moléculaire de la paroi des grams positifs	29
29	Structure moléculaire de la paroi des grams négatifs	30

30	Pouvoir discriminant de certaines techniques pouvant être utilisées dans une approche taxonomique mixte et consensuelle	32
31	images présentes les cinq étapes du développement d'un biofilm	35
32	formation des vésicules à partir de membrane externe de certaines bactéries	36
33	Carte simplifiée des climats mondiaux	41
34	Bilan énergétique terrestre)	43
35	variation des températures du globe depuis 400 000 ans	44
36	Evaluation de la température moyenne annuelle mondiale de 1850-2016	44
37	schéma simple de formation des précipitations	45
38	formation de la pluie	46
39	formation des bruines	46
40	formation de grésil	46
41	formation de grêle	46
42	formation de neige	46
43	formation de la givre ou rosée	46
44	Répartition mondiale de l'augmentation de température (a) et des variations de précipitation (b) pour les scénarios	47
45	circulation de l'eau	48
46	anémomètre	49
47	les principales enveloppes du globe terrestre	50
48	distribution des principaux biomes terrestres	51
49	La structure interne de la Terre	52
50	Fonctionnement du système climatique	55
51	Total annuel des émissions anthropiques de GES par groupes de gaz entre 1970 et 2010	57
52	Les sources de CO ₂ liées à l'activité humaine en 1998	58
53	microorganismes et changement climatiques dans les biomes marins et terrestres	75
54	Préparer l'environnement nécessaire à la croissance de la bactérie madciniana pour étudier sa structure cellulaire	79
55	bactéries aident les plantes à pousser et à combattre les parasites (<i>pixabay</i>)	80
56	Une famille de bactéries paraprotochordries connues pour leur capacité à décomposer les composés aromatiques	80
57	Bactéries <i>Crenothrix</i>	83

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU N°	TITRE DES TABLEAUX	PAGE N°
01	des principes bactéries	25
02	compositions de l'atmosphère (exprimée en ppm (parties pour un million, c'est- à-dire millièmes) par rapport à l'air sec	50
03.	Grands types de climats de Köppen-Geiger	54

Liste des abréviations:

ARN : Acide Ribonucléique

Mm : millimètre

µm : micromètres

16s : sous unité de ribosome

O₂ : oxygène

H₂ : Le dihydrogène

N₂ : nitrogène

CO₂ : le dioxyde de carbone

CH₄ : méthane

ATP : Adénosine triphosphate

H₂O : l'eau

H₂S : Le sulfure d'hydrogène, ou hydrogène
Sulfuré

PH : Le potentiel hydrogène

NaCl : Le chlorure de sodium

ADN : d'acide Désoxyribonucléique

PLP : protéines de liaison aux pénicillines

PBP : pénicilline-binding-protéine

E .coli : Escherichia coli

ADP : adénosine diphosphate

H⁺ : ion hydrogène

AW : L'activité de l'eau

LPS : Lipopolysaccharides

A : adénine

T : thymine

CCM : La chromatographie sur couche
mince

HPLC : Chromatographie en phase liquid
à haute performance

GFP : facteurs d'échange de nucléotides
guanyliques

Lps : Les lipopolysaccharides

°C : Celsius

°F : Fahrenheit

°K : Kelvin

HPA : hecto pascals.

SI : le Système international unités

W : Ouest

O : Ost veut dire Est.

m.s-1 : le mètre par seconde.

km.h-1 : kilomètres par heure .

nd : nœuPPM : parties pour un million.

I : indice d'aridité.

P : précipitations.

GT : gigatonne

OCDE : L'Organisation de coopération et
de développement économiques

AIE : l'agence internationale de l'énergie

CFC : chlorofluorocarbures

UV : ultraviolet

Pg : pétagrammes

E. huxleyi : *Emiliana huxleyi*

O. tauri : *Ostreococcus tauri*

Introduction générale

Introduction général :

La vie sur Terre a évolué au fil de milliards d'années et a généré une importante biodiversité. La présence des microorganismes remonte à l'origine de vie sur Terre, il y a au moins 3,8 milliards d'années et ils existeront probablement bien au-delà de tout événement futur d'extinction. Ils constituent un socle majeur pour la survie de la biosphère et jouent un rôle clé dans les cycles du carbone et des nutriments indispensables à la bonne santé des animaux (y compris l'Homme) et des végétaux. Ils jouent donc par exemple un rôle déterminant dans l'agriculture et le réseau alimentaire mondial. Bien qu'invisible à l'œil nu et donc quelque peu intangibles, les microorganismes soutiennent ainsi l'existence de toutes les formes de vie trophiques supérieures.

Ils sont tout d'abord caractérisés par leur abondance (~ 10³⁰ bactéries et archées au total) et leur diversité, deux facteurs qui leur permettent des réponses variées aux changements environnementaux.

Les microorganismes apportent une contribution majeure en termes de séquestration du carbone, en particulier le phytoplancton marin qui fixe autant de CO₂ que les plantes terrestres. Les changements environnementaux affectent les organismes microbiens marins, la photosynthèse et la séquestration du carbone dans les eaux profondes et donc le cycle du carbone.

Les microorganismes concourent aussi à la dénitrification de N₂O qui produit du di azote N₂, un gaz neutre. Les micro-organismes offrent également d'importantes possibilités de remédier aux problèmes causés par l'Homme par l'amélioration de l'agriculture, la production de biocarburants et la dépollution.

Les microorganismes contribuent également substantiellement aux émissions de gaz à effet de serre par la respiration hétérotrophe qui produit du CO₂ et la méthanogène qui produit du CH₄. L'activité humaine, lorsqu'elle modifie le ratio d'absorption/libération du carbone, accélère le changement climatique.

Chapitre I

Le monde microbien

I. Introduction :

Les microorganismes constituent un ensemble important et diversifié d'organismes microscopiques existant en tant que cellule seule ou en groupe cet ensemble inclut également les virus microscopiques mais non cellulaires.

Les microorganismes sont distincts des cellules animales et végétales qui constituent les macroorganismes celles-ci sont incapables de se développer seules dans la nature et n'existent que comme des parties de structures pluricellulaires telles que les organes chez les animaux ou les composants structuraux chez les plantes, au contraire, de nombreux microorganismes sont capables d'effectuer leur cycle vital, de produire leur énergie et de se reproduire indépendamment des autres cellules (**Michael et John,2007**).

Nous aborderons au cours de ce chapitre la découverte des microorganismes et leurs caractéristiques et l'importance de la vie microbienne.

II. Histoire des microorganismes :

En 1673, **Antoni Van Leeuwenhoek** (1632-1723) fut le premier à observer les bactéries qu'il appela *animalcules*. En plus de la première description des globules rouges et des *spermatozoïdes*, ce drapier hollandais observa pour la première fois les bactéries et décrivit leurs différentes formes (**fig01**). Ce n'est que deux siècles plus tard que le rôle des bactéries dans les processus de fermentation et dans la transmission des bactéries a été découvert et que leur étude a commencé. Les scientifiques les plus illustres de cette époque furent Louis Pasteur (**fig 03**) et Robert Koch (**fig02**).

L'universalité du code génétique a montré que tous les organismes vivants, eucaryotes et procaryotes, descendent d'un seul et même ancêtre. L'étude de gènes existants chez tous les êtres vivants, du fait de fonctions métaboliques particulièrement importantes, comme ceux codant pour les ARN ribosomiques, a montré que leurs séquences ont peu varié au cours des âges et que la comparaison de ces séquences permet de trouver les relations existant entre organismes. (**Anonyme ¹**).



Figure01 : microscope de Van Leeuwenhoek (**Juan, 2019**).

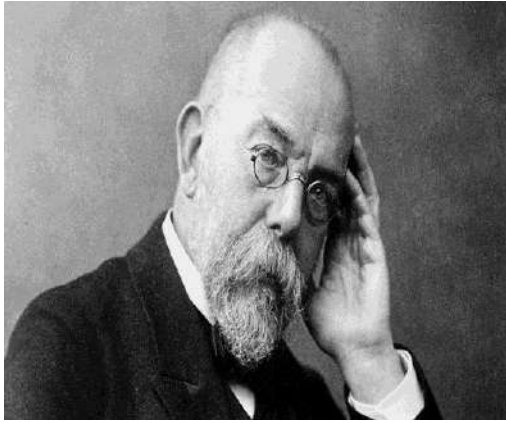


Figure 02 : Robert Koch (1843_1910)
(Wall street international magazine, 2019)



figure03 : Louis Pasteur
(Annick Opinal, 2013)

III. Définition des microorganismes :

Ce terme (microorganisme) englobe tous les organismes vivantes, de petites dimensions nécessitant le microscope pour leurs observations, l'œil nu ne peut percevoir les objets ou les microorganismes dont le $\varnothing < 0,05 \text{ mm} = 50 \mu\text{m}$. (Emmanuel, 2016)

Autre définitions :

Microorganisme est un organisme microscopique. Ce terme de biologie désigne un type d'organisme vivant, non visible à l'œil nu à cause de sa petite taille. Il s'agit de bactéries (par exemple *Escherichia-coli*) (**fig 04**), virus, protistes et champignons unicellulaires ; Ils jouent un rôle essentiel dans l'équilibre des écosystèmes.(Anonyme²).

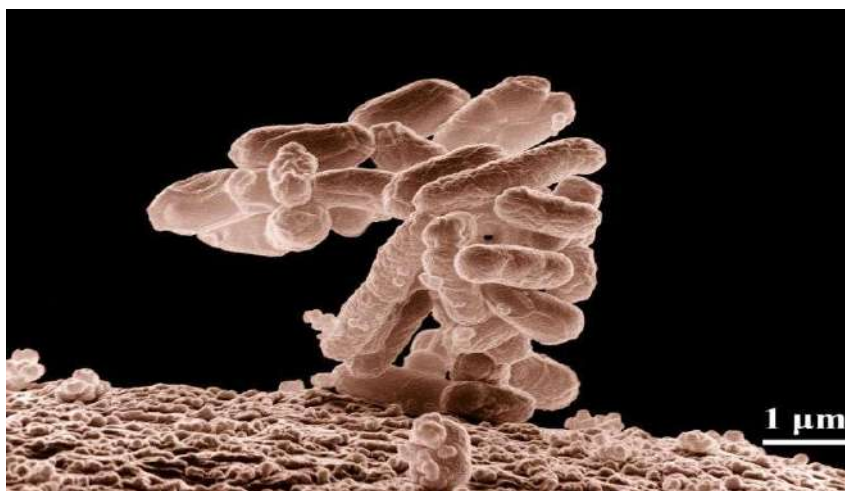


Figure04 : des Bactéries *Escherichia-coli* grossies 10.000 fois
(futura-science, 2021)

IV. Les Catégories de microbes :**IV.1. Les bactéries :**

Ne mesurent souvent pas plus d'un micromètre (μm), un millième de millimètre. Les bactéries ont été observées pour la première fois par un marchand de tissus, Antoine van Leeuwenhoek, en 1668. Voulant mieux juger la qualité de ses tissus, il examina la fibre à travers une petite boule de verre qui lui servait de lentille et distingua des bactéries grâce à la microscopie qu'il venait de découvrir.

Une bactérie est un organisme vivant qui se reproduit par fission pour créer deux bactéries à partir d'une seule, lesquelles vont ensuite en donner 4, puis 8, 16, 32, 64, etc. C'est ce que nous appelons une croissance exponentielle. Ainsi, à partir d'une seule bactérie se forme une population d'un million de bactéries en 20 générations, soit en moins de 7 heures pour des bactéries qui se multiplient toutes les 20 minutes. Rien d'étonnant donc à ce qu'elles soient si nombreuses. Un gramme de terre peut par exemple en contenir 1 milliard.

Elles sont aussi partout, dans l'air, l'eau, le sol, les plantes, les animaux et les hommes et d'une très grande variété. Nos intestins sont par exemple habités par plus de 600 bactéries différentes. (Patrick et al, 2021)

IV.2. Les virus :

Sont infiniment plus petits que les bactéries. Même des filtres extrêmement fins (<0.2 micromètres) ne permettent pas de les retenir. Ce sont des entités à la limite du vivant. Leur matériel génétique est enveloppé dans une coque protéique et parfois dans une membrane. Contrairement aux bactéries, leur génome ne code pas pour un métabolisme cellulaire qui permet leur multiplication. Ce sont de vrais parasites qui ne peuvent se multiplier sans cellules hôtes. Néanmoins, les virus ont écrit l'histoire de l'homme comme personne d'autre en causant par exemple de graves épidémies (grippe espagnole, SIDA, etc.). Le plus souvent décriés, ils peuvent aussi être porteurs d'espoir comme ces virus destinés à servir d'outils aux thérapies géniques permettant de lutter contre de très graves maladies. (Patrick et Karl, 2021).

IV.3. Les protozoaires et les champignons :

Sont souvent classifiés comme parasites. Parmi les protozoaires figure par exemple l'agent de la malaria, un microbe dénommé *Plasmodium falciparum* qui utilise un moustique comme vecteur pour infecter de nouveaux individus. Mais pas tous les protozoaires sont nuisibles pour l'homme, il en existe une multitude ($> 20\ 000$ espèces) qui jouent un rôle très important dans l'environnement. Quant aux champignons, citons les

levures du genre *Saccharomyces*, que nous apprécions pour la fabrication de pain ou de boissons alcoolisées (bière, vin), ou d'autres, dont nous nous passerions volontiers, tels ceux à l'origine de mycoses. **(Patrick et Karl, 2021).**

V. Classification des microorganismes :

Depuis leur découverte par Anthony van Leeuwenhoek, la place des bactéries dans le monde vivant a beaucoup évoluée.

Le botaniste suédois Carl van Linné (1735), élaborera une première classification des organismes vivants en deux règnes Plantes et Animaux.

En 1857, Karl van Nageli proposa de classer les bactéries et les champignons dans le règne des Plantes.

En 1866, E. Haeckel divise le monde vivant en trois règnes, le règne animal, le règne végétal et le règne des protistes qui rassemble les algues, les protozoaires, les champignons et les bactéries.

En 1937 et grâce à l'invention du microscope électronique, Edward Chatton mis en opposition deux types de cellules, la cellule eucaryote et la cellule procaryote.

En 1938, H.F. Copeland sépare le règne des bactéries (ou "*Monera*") de celui des protistes.

En 1961 cette définition des procaryotes fut renforcée par Roger Stanier.

En 1968, R.G.E. Murray, dans la continuité du travail d'E. Chatton, divise le monde vivant en deux règnes, celui des "Eucaryotes" et celui des "Procaryotes" (ou "*Monera*"). Au sein du règne des Procaryotes, R.G.E. Murray distinguait 04 divisions retrouvées dans le manuel de Bergey: La division des "*Gracilicutes*". Regroupant les bactéries à Gram négatif.

La division des "*Firmicutes*". Regroupant les bactéries à Gram positif. La division des "*Tenericutes*". Bactéries dépourvues de paroi. La division des "*Mendosicutes*". Archaeobactéries.

En 1969, Robert H. Whittaker décrit une classification à cinq règnes. Quatre règnes eucaryotes (Animal, Végétal, Champignons et Protistes). Les procaryotes se regroupent dans le règne des monères.

En 1978 CR, Woese est arrivé à diviser les organismes vivants en trois domaines. Le domaine des Bactéries ou Eubactéries, le domaine des Archées et le domaine des Eucaryote (animaux, plantes, les mycètes et les protistes). **(Yahiaoui, 2015).**

VI. Structure :

Une taille de loin plus réduites que celles des cellules animales et végétales. Les cellules animales et végétales sont incapables d'exister indépendamment de leur organisme.

La taille réduite des protistes confère des avantages physiologiques ; Un rapport surface /volume supérieur à celui de tous les autres organismes vivants, ce qui permet des échanges et des interactions remarquables avec le milieu. Sans oublier une dissémination et une distribution dans la nature unique et impressionnante.

VII. Reproduction :

Les protistes et en particulier les bactéries ont des modes de reproduction simples, spécifiques et rapides (temps de génération courts). *Escherichia coli* par exemple, se reproduit par simple division binaire en 20 minutes. Cela se produit bien sûr en conditions optimales de culture en laboratoire. Ces taux de croissance exceptionnels induisent des rendements de croissances incomparables.

VIII. Métabolisme :

Les microorganismes et en particulier les bactéries ont une propriété fondamentale qui est la diversité de leur métabolisme. Individuellement, chaque micro-organisme est spécifiquement adapté à la métabolisation d'un nombre plus ou moins limité de substrats. Ce qui explique leur distribution en fonction des caractéristiques nutritionnelles et physicochimiques du milieu. Mais, pris dans leur ensemble, les microorganismes peuvent métaboliser toutes les substances organiques naturelles et même synthétiques.

Ce processus constitue la minéralisation de la matière vivante et le recyclage des éléments chimiques qui forment la matière organique. Ceci permet de préserver l'environnement.

Une des armes métaboliques des bactéries est la synthèse d'enzymes inductibles uniquement en présence de leurs substrats spécifiques.

IX. Ecologie :

Les micro-organismes sont ubiquitaires, ils sont présent dans tous les écosystèmes :

IX.1. Dans les mers et les océans :

Ils constituent la biomasse (base du 1er échelon d la chaîne alimentaire) qui nourrit l'ensemble de la faune marine.

IX.2. Dans le sol :

Ils jouent un rôle dans la décomposition de la matière organique, la fourniture de l'azote assimilable aux plantes, la minéralisation de la matière organique.

Les micro-organismes participent activement aux équilibres gazeux de l'atmosphère, en étant à la fois producteurs et consommateurs, d'O₂, H₂, N₂, CO₂, CH₄.

IX.3. Le long de l'appareil digestif des animaux :

En effet, ce dernier est tapissé de bactéries très utiles à notre bien-être digestif ; la majorité d'entre elles sont apportées à la naissance par la mère, puis, par l'environnement et la nourriture. Tout au long de la vie, les populations évoluent procurent les enzymes nécessaires à la digestion de certains aliments. De plus, elles évitent que d'autres microorganismes dangereux colonisent le tube digestif et nous rendent. (Yahiaoui, 2015).

X. La diversité de la physiologie des micro-organismes :

Toutes les cellules ont besoin de produire de l'énergie et de la conserver. Toutes requièrent aussi des mécanismes frénétiques autorisant la réplication et permettant l'adaptation à leur différent environnement.

Les sources d'énergie sont d'une importance primordiale pour les cellules, car les processus vitaux consomment beaucoup d'énergie. Trois stratégies s'offrent pour puiser l'énergie de la nature : à partir des composés organiques, des composés inorganiques ou de la lumière (fig05).

X.1. Les chimio-organotrophes :

Des milliers de composés organiques existant sur la Terre peuvent être utilisés par un microorganisme naturel et la plupart des composés organiques synthétiques peuvent être métabolisés par un ou plusieurs microorganismes.

L'énergie est obtenue par oxydation d'un de ces composés (perte de ses électrons) et accumulée dans la cellule sous la forme d'un composé riche en énergie, l'adénosine triphosphate (ATP) (fig 05).

Certains microorganismes peuvent extraire l'énergie d'un composé seulement en présence d'oxygène : ces organismes sont qualifiés d'aérobies. Au contraire, d'autres microorganismes ne peuvent extraire leur énergie qu'en absence d'oxygène (anaérobie). Néanmoins, certains d'entre eux sont indifférents à la présence ou l'absence d'oxygène.

Les organismes puisant leur énergie à partir de composés organiques sont appelés chimio-organotrophes (fig 05) et représentent la majeure partie des microorganismes cultivés.

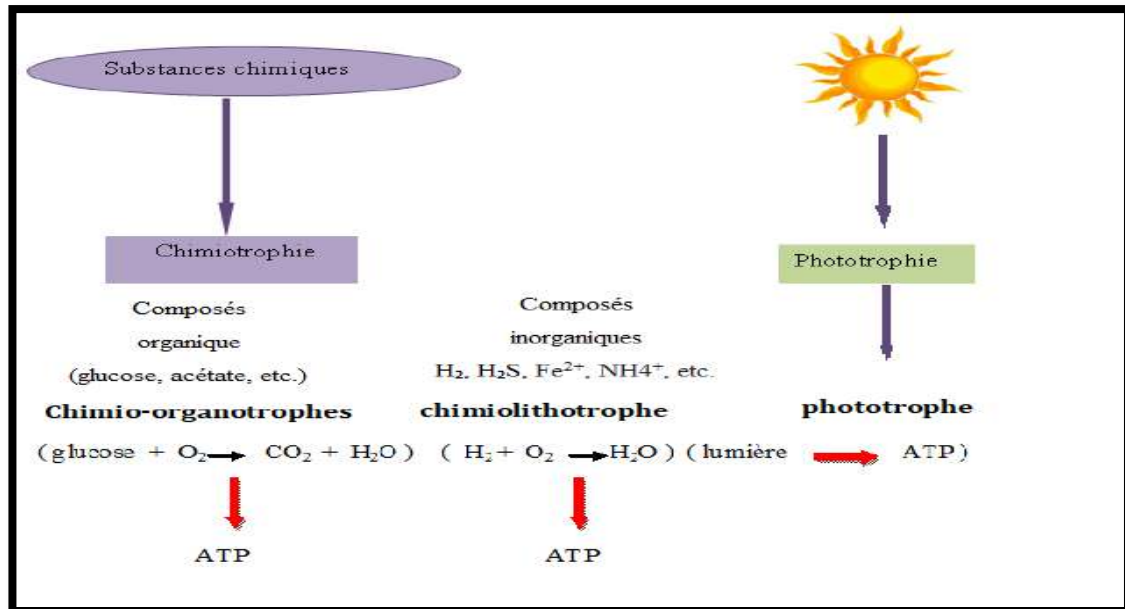


Figure05: Différente options métaboliques pour l'obtention d'énergie. (Michael et John, 2007)

X.2. Les chimiolithotrophes:

De nombreux procaryotes peuvent utiliser l'énergie disponible dans les composés inorganique. Il s'agit là d'une forme de métabolisme appelée *chimiolithotrophie* (découverte par Winogradsky), qui est employée par des chimiolithotrophes (**fig05**). Cette forme de métabolisme producteur d'énergie n'est présente que chez les procaryotes et est prévalent chez les Archées et les Bactéries. L'éventail des composés inorganiques utilisés est très large, mais en règle générale, un procaryote spécifique se spécialise dans l'utilisation d'un groupe de composés inorganiques ou de sa famille.

La raison pour laquelle la capacité d'extraire de l'énergie de composés inorganiques s'imposés inorganiques s'impose comme une évidence est qu'elle évite la concurrence avec les chimio-organotrophes.

De plus, de nombreux composés inorganiques oxydés, tels que le H₂ et H₂S, sont des déchets de ces chimio-organotrophes ; ainsi, les chimiolithotrophes ont élaboré des stratégies évoluées pour exploiter des ressources que d'autres organismes sont incapable d'utiliser.

X.3. Les phototrophes :

Les microorganismes phototrophes possèdent un pigment qui leur permet d'utiliser la lumière comme source d'énergie, ce qui explique par ailleurs leurs colorations cellulaires (**fig06**).

A la différence des organismes chimiotrophes, les phototrophes ne requièrent pas de composés chimiques comme source d'énergie, l'ATP étant produite à partir de l'énergie

solaire. Cela constitue un avantage important, car il exclut toutes compétitions pour l'énergie avec les chimiotrophes, la lumière étant disponible dans un grand nombre d'habitats microbiens.

Il existe deux types de phototrophes chez les procaryotes. L'une est appelée photosynthèse oxygénique et produit de l'O₂. La photosynthèse oxygénique est caractéristique des cyanobactéries et des micro-organismes phylogéniquement affiliés. L'autre forme appelée photosynthèse anoxygénique, intervient chez les bactéries vertes et pourpes et ne conduit pas à la production d'O₂. Néanmoins, ces deux groupes de phototrophes utilisent la lumière pour produire de l'ATP, et leurs mécanismes de synthèse sont remarquablement similaires. En effet, les principes de base de la photosynthèse oxygénique ont évolué à partir des procédés anoxygéniques, moins complexes.

X.4. Les hétérotrophes et les autotrophes :

Toutes les cellules nécessitent du carbone comme nutriment principal. Les cellules microbiennes sont soit hétérotrophes, nécessitant un ou plusieurs composés organiques comme source de carbone, soit autotrophes, leur source de carbone étant le CO₂. Les chimio-organotrophes sont aussi des hétérotrophes ; à l'opposé, de nombreux chimolithotrophes et pratiquement tous les phototrophes sont autotrophes.

Les autotrophes sont parfois appelés producteurs primaires, parce qu'ils synthétisent de la matière organique à partir du CO₂, à la fois pour leur propre bénéfice et celui des chimio-organotrophes. Ces derniers se nourrissent directement des producteurs primaires ou à partir des produits qu'ils excrètent. Toute la matière organique de la terre a été synthétisée par des producteurs primaires, principalement des organismes phototrophes.



Figure 06 : protéobactéries phototrophe.

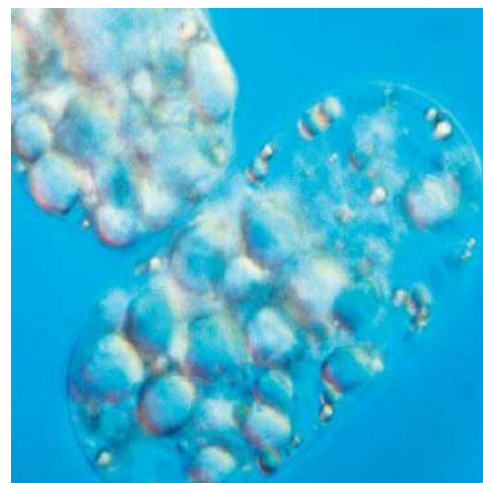


Figure 07: chimolithotrophe.

(Michael et John, 2007)

XI. La diversité des procaryotes :

Le groupe des procaryotes se scinde en deux domaines distincts, les Arches et les Bactéries. La plupart des procaryotes que connaît l'étudiant débutant en microbiologie appartiennent au domaine des Bactéries.

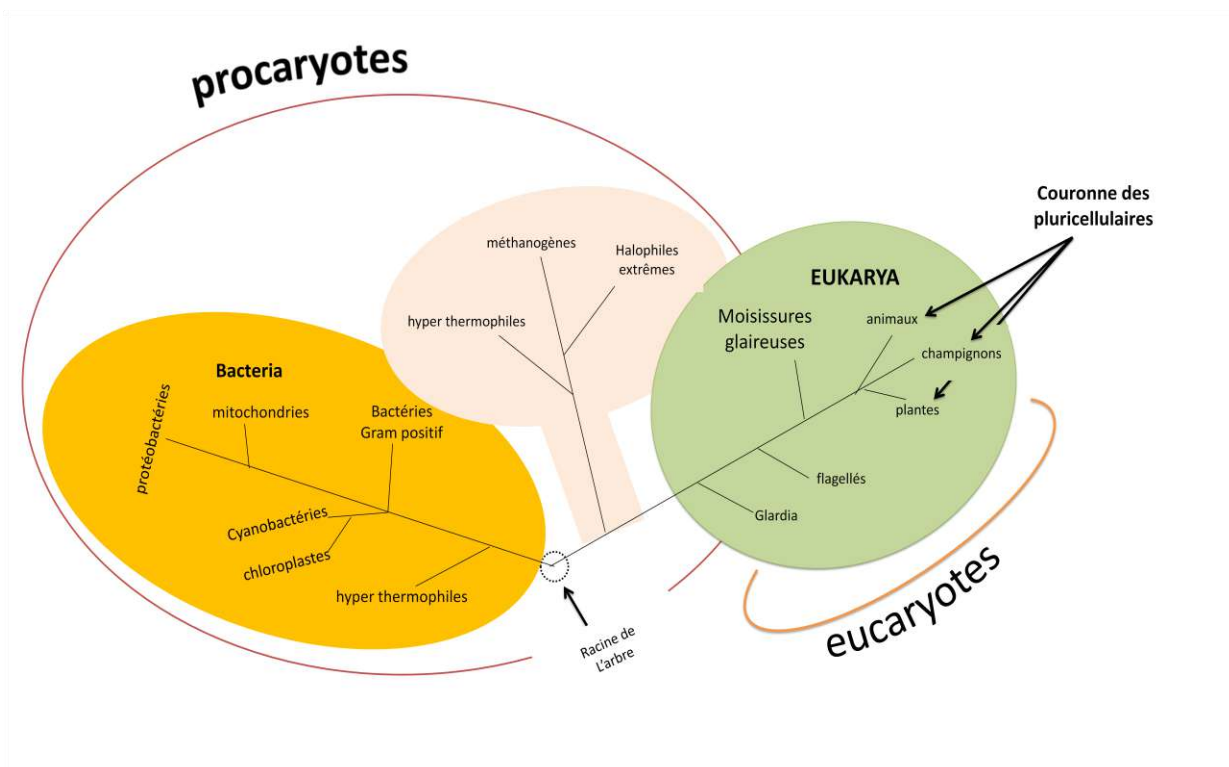


Figure 08 : Arbre phylogénique universel du vivant défini à partir des comparaisons de séquences du gène d'ARN. (Michael et John, 2007).

XI.1. Les Bactéries :

Le domaine des bactéries est extrêmement diversifié, comportant tous les procaryotes pathogènes connus à ce jour, ainsi que des certaines d'autres espèces non pathogènes. De plus, ce domaine présente une grande variété de morphologies et de physiologie. Les protéobactéries sont le groupe (*phylum*) le plus important des bactéries (**fig08**).

Chez les Protéobactéries se retrouvent un grand nombre de chimio_organotrophes, tel qu'*Escherichia coli*, organisme modèle en physiologie, biochimie biologie monoculaire. Plusieurs phototrophe (**fig06**) et chimiolithotrophes (**fig07**) sont aussi des Protéobactéries.

De nombreux chimiolithotrophes utilisent le sulfure d'hydrogène (H_2S , odeur d'œuf pourri) dans leur métabolisme, conduisant à la production de soufre élémentaire stocké à l'intérieur ou en périphérie de la cellule (**fig07**).

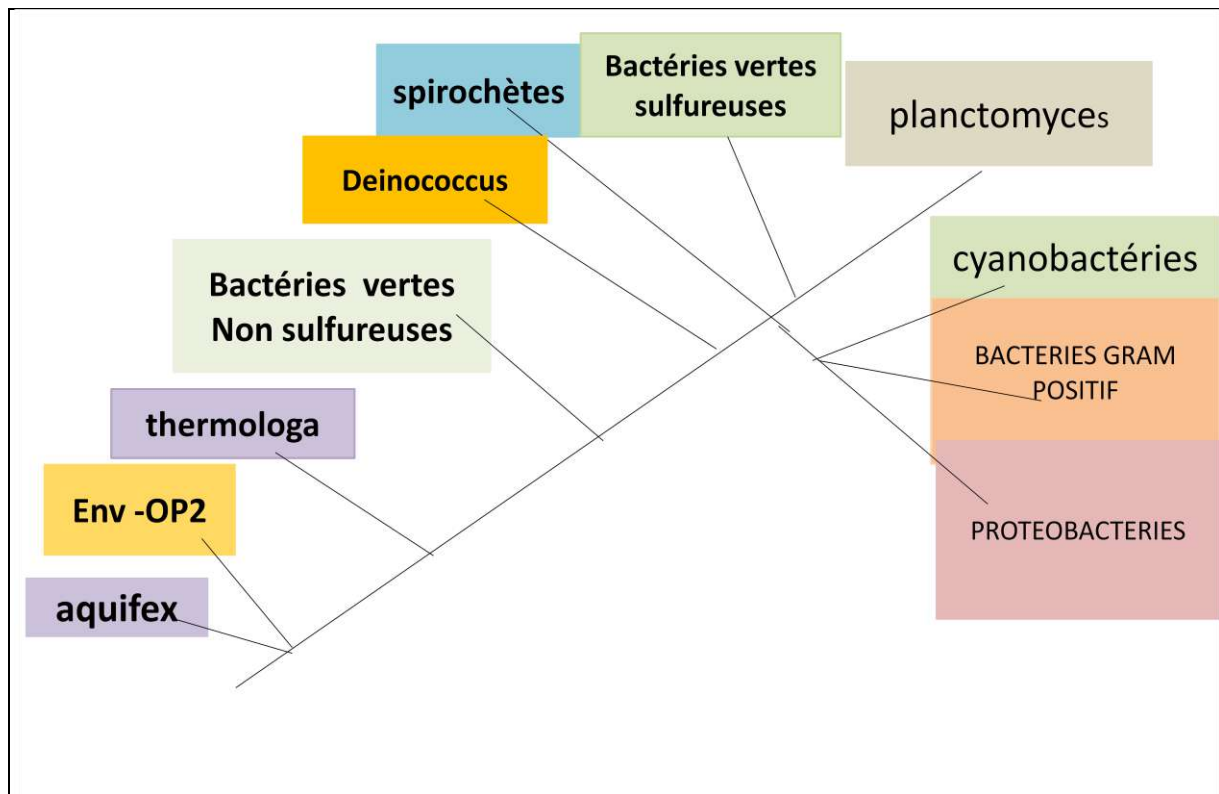


figure09 : arbre phylogénique détaillé des Bactéries

Le soufre est un produit d'oxydation du H_2S et peut à son tour être oxydé en sulfate (SO_4^{2-}). Le sulfure (S^{2-}) et le soufre sont oxydés pour permettre la réalisation d'importantes réactions métaboliques, telles que la fixation de CO_2 (autotrophie) où la production d'énergie (**fig05**).

De nombreux autres procaryotes communs du sol, de l'eau, des plantes, des animaux, ainsi que des espèces pathogènes (*Salmonelle*, *Rickettsie*, *Neisseria* et bien d'autres encore), sont des protéobactéries. Certaines bactéries peuvent être distinguées par utilisation de la coloration de Gram, technique qui permet de distinguer les cellules gram positif des cellules Gram négatif.

De nombreuses espèces de bactéries ont des morphologies uniques. Ces espèces incluent le groupe aquatique des planctomyces, qui se caractérisent par des cellules comportant un pédoncule leur permettant de se fixer à un substrat solide (**fig10**).

Elles incluent aussi les spirochètes, bactéries de forme hélicoïdales responsables de nombreuses maladies, notamment la maladie de *Lyme* (**fig11**).

Deux autres de Bactérie sont phototrophes : les Bactéries vertes sulfureuses (groupe des *chlorobium*) et les bactéries vertes non sulfureuses (groupe des *chloroflexi*) (**fig 12,13**).

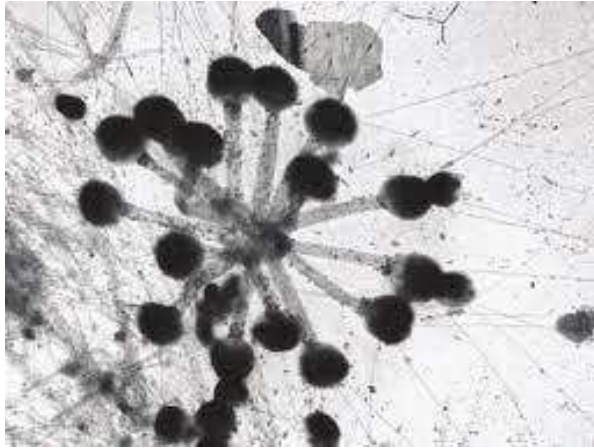


Figure 10 : Morphologie stypique de la bactérie *pedunculée planctomyces*

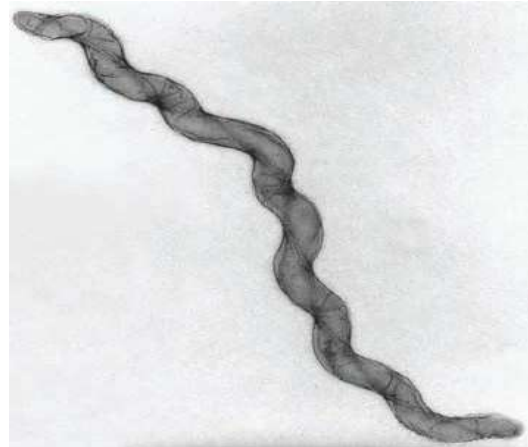


Figure 11 : Spirochètes

(Michael et John, 2007)

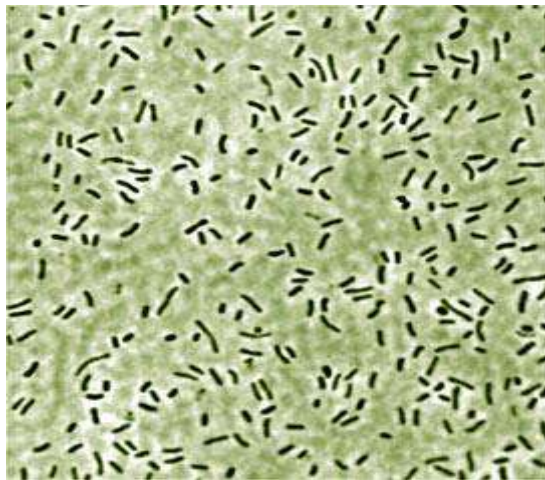


Figure 12 : Bactéries verte sulfureuse (*Chlorobium*)

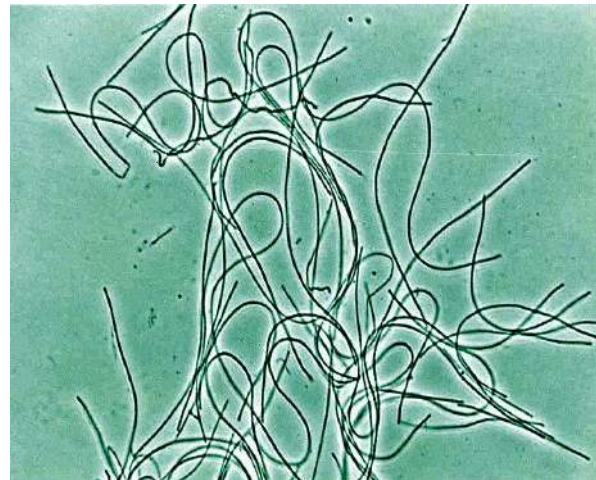


Figure13 : bactéries vertes non sulfureuses (*chloroflexi*)

(Alchetron, 2018)

Ces espèces contiennent toutes deux des pigments photosynthétiques similaires et sont capables d'autotrophie. *Chloroflexi* est un procaryote filamenteux retrouvé au niveau des sources chaudes, ainsi que des baies marines peu profondes, et représente souvent l'organisme majoritaire des tapis bactériens. *Chloroflexi* est aussi remarquable car il est soupçonné d'être un chaînon important dans l'évolution de la photosynthèse.

Le genre *Chlamydia* (**fig09**) dont la plupart des espèces hébergées chez l'homme, sont des pathogènes transmissibles par voies sexuelles et respiratoires. Les *Chlamydia* sont des parasites intracellulaires obligatoires, ce qui signifie qu'elles vivent à l'intérieur de cellules d'organismes évolués, et dans ce cas de cellules humaines.

Un autre groupe majeur de bactéries, *Deinococcus* (**fig 09**), est composé de bactéries présentant des parois cellulaires inhabituelles et qui sont capables de résister à des taux d'irradiation important, *Deinococcus radiodurans* (**fig14**) étant la principale espèce des survivre à des doses de radiation largement supérieures à celles suffisantes pour tuer un animal, grâce a des mécanismes de réparation de son génome.

Enfin quelques groupent des bactéries ont la capacité de croitre à des températures élevées (hyperthermophilie).

Ainsi, des organismes tels qu'*Aquifex* (voir **fig15**) et *Thermotoga* sont capables de se développer dans l'eau proche de son point d'ébullition (sources hydrothermales).

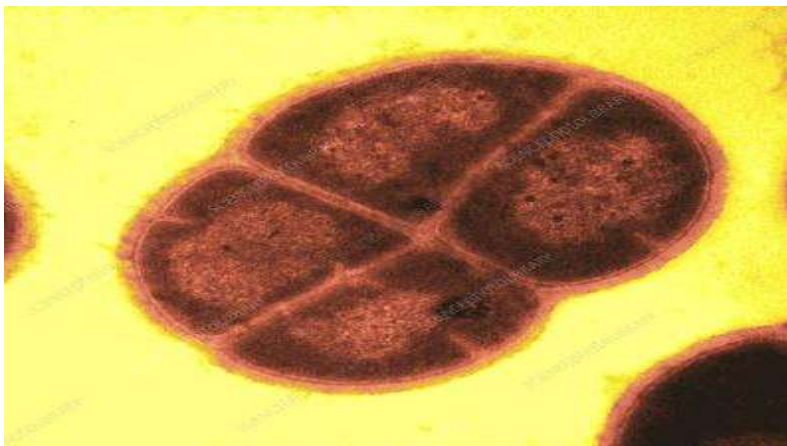


Figure14 : *Deinococcus radiodurans*
(science photo library, 2021)

Le caractère précoce de la bifurcation de ces groupes (**fig 08** et **fig 09**) conforte l'idée qu'à l'origine la température à la surface de la terre était bien plus élevée qu'aujourd'hui.

Les organismes primitifs étaient donc probablement des *hyperthermophiles*. C'est ce que montrent les arbres phylogénétiques des Bactéries et des Archées (voir **fig 09** et **fig16**).

Des micro-organismes tels qu'*Aquifex*, *Methanopyrus* et *Pyrolobus* pourraient donc être considérés comme les descendants de très anciennes lignées cellulaires.



Figure 15 : *Aquifex* (Micheal et John, 2007)

XI.2. Les Archées :

Le domaine des Archées (voir **fig16**) se divise en deux : les *Euryarchéotes* et les *Crénarchées*. Chacune de ces divisions représente une branche majeure de l'arbre des Archées. De nombreux Archées sont des extrémophiles, dont certaines espèces sont capables de croître à des températures et des pH extrêmes. Par exemple, *Pyrolobus* (**fig17** et **fig 18**) est le procaryote le plus thermophile connu.

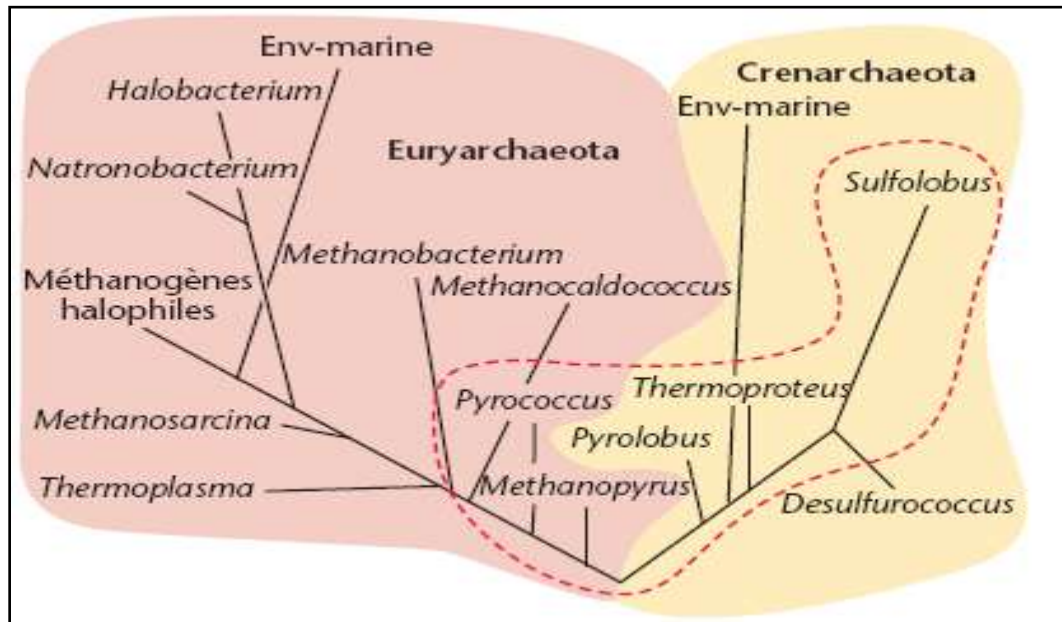


Figure16 : arbre phylogénétique détaillé du domaine des archées
(Michael et John, 2007).

Toutes les Archées sont chimiotrophes, bien qu'*Halobacterium* puisse utiliser la lumière pour synthétiser de l'ATP, mais d'une manière différente des autres organismes phototrophes.

Certaines Archées utilisent des composés organiques dans leur métabolisme énergétique. Néanmoins, la plupart sont chimiolithotrophes, leur principale source d'énergie étant l'hydrogène (H_2) (**fig 05**).

Les *Euryarchéotes* se subdivisent en trois groupes d'organismes ayant des physiologies distinctes. Certaines espèces ont besoin d'oxygène (O_2), alors qu'il est létal pour d'autre ; d'autres espèces sont capables de croître à des niveaux extrêmes de pH.

Les méthanogènes tels que *Methanobacterium* sont des anaérobies strictes. Leur métabolisme est unique en ce sens qu'ils puisent leur énergie en produisant un composé riche en énergie, le méthane (gaz naturel).

Les halophiles extrêmes sont phylogénétiquement proches des méthanogènes (**fig17**), mais physiologiquement distincts. A la différence des méthanogènes qui sont tués en présence d'oxygène, les halophiles extrêmes requièrent de l'oxygène et sont caractérisés par leurs besoins élevés en sels (Na Cl) nécessaire à leur métabolisme et leur reproduction. C'est pourquoi ces micro-organismes sont appelés halophiles

Un dernier groupe d'Archée est constitué par les thermoacidophiles, tels que *Thermoplasma* (**fig19**), ces procaryotes ont une faculté de croissance optimale à des températures élevées et à des PH extrêmement faibles.

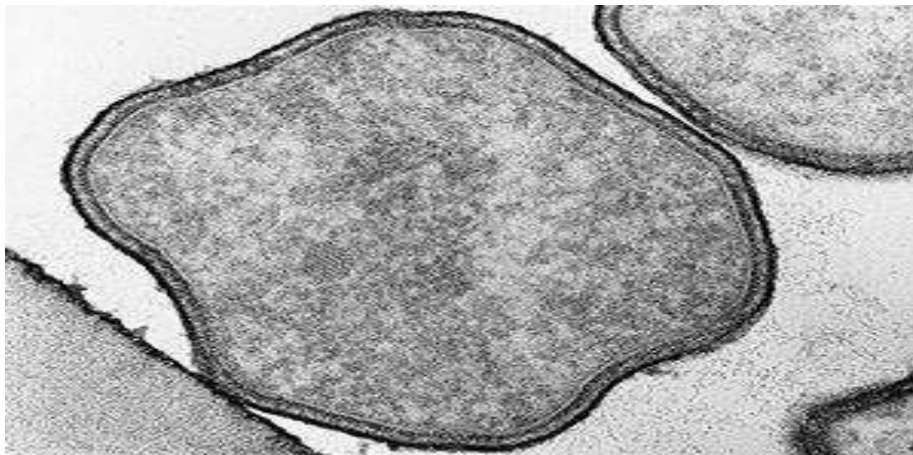


Figure17 : *pyrolobus* (Blöchl et al, 1997)



Figure18: Procaryotes acidophiles extrêmes (*Thermoplasma*)

(Micheal etJohn, 2007)

XII. La diversité microbienne des eucaryotes :

Tout comme les procaryotes , il existe une très grande diversité d'eucaryotes , ces microorganismes sont communément appelés protistes , certains d'entre eux , tels que les algues (**fig 21**) sont phototrophes , en effet, ces algues contiennent des organites riches en chlorophylle appelés chloroplastes est peuvent vivre dans des environnements pauvres composés de seulement quelques minéraux (par exemples k, p, mg, n, s,) d'eau ,CO₂ et de lumière, les algues sont

présentes dans des habitats terrestres et aquatiques, et sont les principaux producteurs primaires, les mycètes (**fig 22**) sont soit unicellulaires (levure), soit filamenteux (moisissures) , et ne possèdent pas de pigments photosynthétiques, ces champignons sont d'ailleurs les principaux agents de biodégradation de la nature et recyclent la majorité de la matière organique des sols et d'autre écosystèmes.

Les cellules des algues et des champignons possèdent des parois cellulaires alors que les protozoaires (**fig 23**) , n'en ont pas , la plupart des protozoaires sont mobiles et certaines espèces sont ubiquistes (habitats aquatique, pathogène humain et animal), différents protozoaires sont répartis sur l'arbre des eucaryotes, certains espèces telles que les flagellés se retrouvent à la base de l'arbre , alors que d'autre espèces ciliées , telles que *paramecium* (**fig 23**) se retrouvent dans les branches supérieures (**fig 20**), les *myxomycètes* ressemblent à des protozoaires d'un fait qu'ils sont mobiles et n'ont pas de paroi cellulaire, mais ils en diffèrent phylogénétiquement et par leur cycle biologique, durant ce cycle, les cellules mobiles s'agrègent pour former des fructifications à partir desquelles sont produites les spores qui donneront naissance à de nouvelles cellules. (**Michael et John, 2007**).

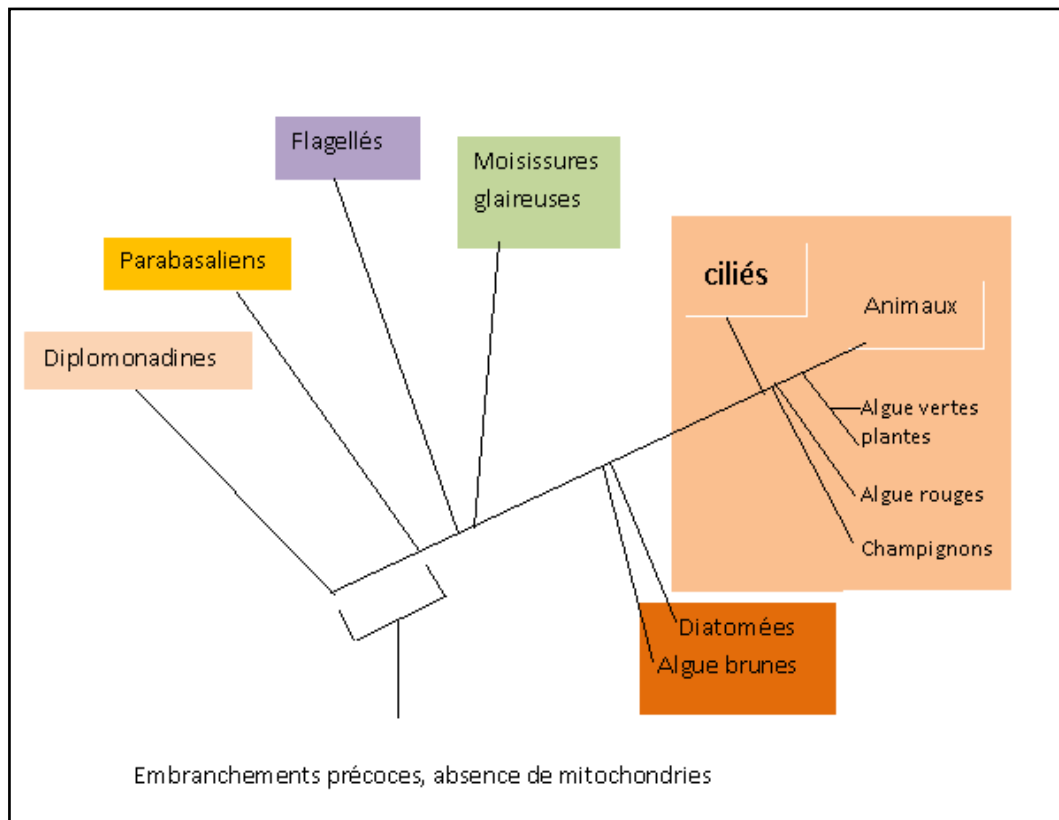


figure19 : Arbre phylogénétique détaillé du domaine des Eucaryotes (**Michael et John, 2007**).

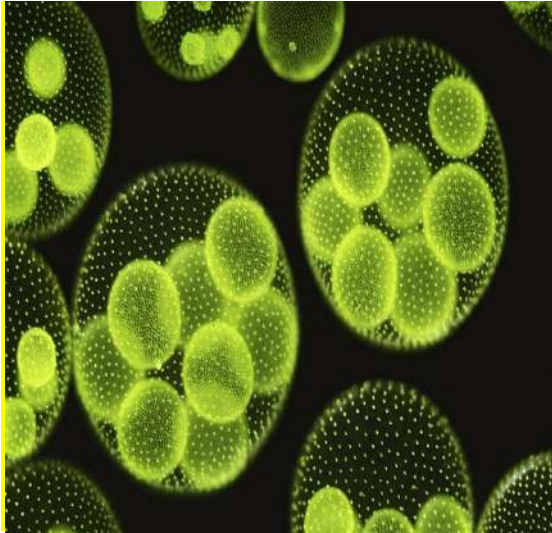


Figure20 : Algue verte de structure coloniale Volvox (Ayoub, 2018).

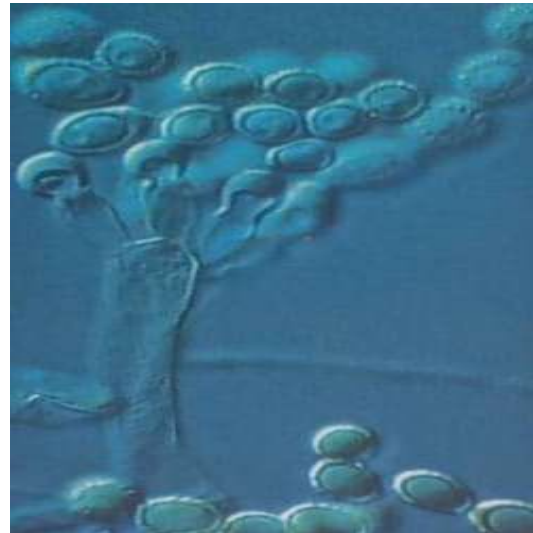


Figure 21 : Champignons de structure sporulante typiques d'une moisissure.(Michael et John2007).

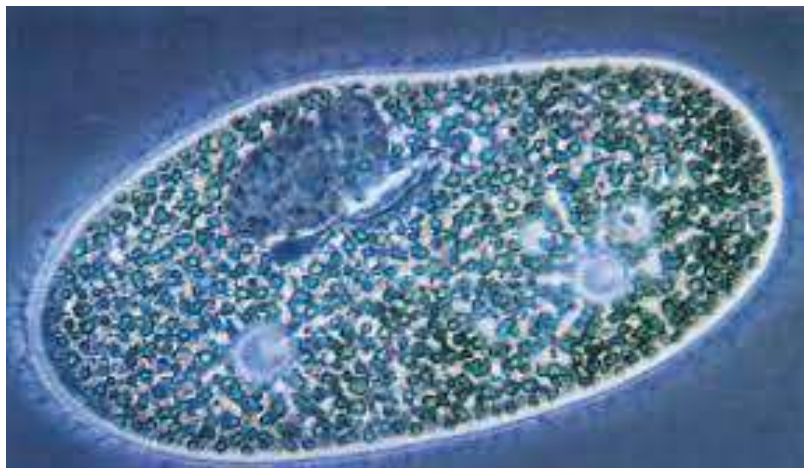


Figure 22 : protozoaire (cilié paramecium) (biologiefsac, 2010).

Les myxomycètes sont les premiers protistes à formes des coopérations cellulaires pour créer des structures microscopiques. ; Les lichens sont des structures foliacées colonisant majoritairement les rochers, les arbres et autres surfaces (**fig 24**) il sont un exemple de mutualisme microbien, association à bénéfice réciproque entre les différents partenaires, les lichens sont composés d'un champignon qui sert de support et de protection, et d'un partenaire phototrophique (producteur primaire) qui est soit une algue (eucaryote) soit une cyanobactérie (procaryote).

Les lichens est ainsi un organisme dynamique qui a développé une stratégie d'interaction mutualistes entre deux micro-organismes très différents.



Figure23 : lichens (sur un rocher, et sur une souche d'arbre mort). (Michael et John, 2007).

VIII. L'importance de vie microbienne :

Les microorganismes sont petits, mais leur biomasse terrestre est énorme, même lorsqu'elle est comparée à la biomasse des organismes supérieures, l'examen de matériaux naturels comme les sols ou les eaux révèle toujours des cellules microbiennes, bien que de toutes petites cellules semblent être sans conséquence, les cellules seules sont pourtant capables de se multiplier rapidement et de produire de vastes populations qui auront un effet majeur sur l'habitat. Les microorganismes sont donc extrêmement importants et constituent des composants quantitativement significatifs dans tout écosystème.

L'estimation de la totalité des cellules microbiennes sur la terre, et plus spécifiquement du nombre de procaryotes, la totalité du carbone présent chez l'ensemble des petites cellules équivaut à celui de toute les plantes sur la terre (le carbone des plantes étant plus abondant que le carbone des animaux) ; de plus, les contenus en azote et phosphore totaux des cellules procaryotes qui sont dix fois supérieurs à ceux des plantes.

Ainsi, les cellules procaryotes, aussi petites soient-elle , constituent la majeure portion de la biomasse terrestre et sont les réservoirs clés des nutriments essentiels pour la vie, une autre la révélation surprenante et que la plupart des cellules procaryotes ne résident pas à la surface de la planète , mais au contraire dans les subsurfaces terrestre et océanique , ces habitats sont encore peu explorés et il reste aux microbiologistes de nombreuses découvertes à faire pour mieux comprendre les formes dominantes de la vie sur la terre (Michael et John,2007).

Chapitre II
Les Bactéries

I. Définition des bactéries:

Les bactéries sont des êtres unicellulaires qui possèdent les éléments essentiels à la vie cellulaire. Leur taille varie de 1 à 10 microns (μm). Elles ne sont donc visibles qu'au microscope optique ($\times 103$) ou au microscope électronique ($\times 106$). Elles peuvent être désintégrées par divers procédés physiques et chimiques, ce qui permet d'étudier les constituants bactériens ainsi libérés. Quelques chiffres concernant une bactérie-type, *Escherichia coli* :

-Poids d'une cellule : 10^{-12} g ;

-Eau : 70 % ;

-Poids sec d'une cellule : 3×10^{-13} g.

Proportion du poids sec :

-protéines 55 %, lipides 10% ;

-lipopolysaccharides (LPS) 3% ;

-peptidoglycane 3%, ribosomes 40%, ARN 20%, ADN 3%. (MSU, 2003).

II. La morphologie bactérienne :**II.1. La forme bactérienne :**

La forme de la cellule varie beaucoup d'une espèce bactérienne à l'autre, les cellules arrondies ou << sphériques >> - de quelque espèce qu'elle soient ; ont reçu le nom de coques, les cellules allongées, en forme de bâtonnet, sont appelées bacilles ou simplement bâtonnets ; tous les coques ne sont pas vraiment sphériques, et tous les bacilles n'ont pas exactement la même forme, par exemple, certains coques sont plus ou moins réniformes, certains bacilles s'effilent à chaque extrémité (bacilles fusiformes) ou s'incurvent (vibrions).

Les cellules ovoïdes, intermédiaires entre coques et bacilles, ont reçu le nom de coccobacilles. Il existe aussi deux types de cellules spiralées : certains plutôt rigides d'autre flexibles ; il ya encore ce qu'on appelle les << bactéries carrées >> (cellules plates et carrées) et les << bactéries en forme de boîte >> (cellules angleuses, de forme variée).

Enfin, on trouve les actinomycètes dont la plupart des espèces croissent en minces filaments, appelés hyphes (**fig 24**), qui rappellent les champignons.

Un réseau ou une masse d'hyphes constitue un mycélium montrant diverses formes de bactéries. (Paul, 2005).

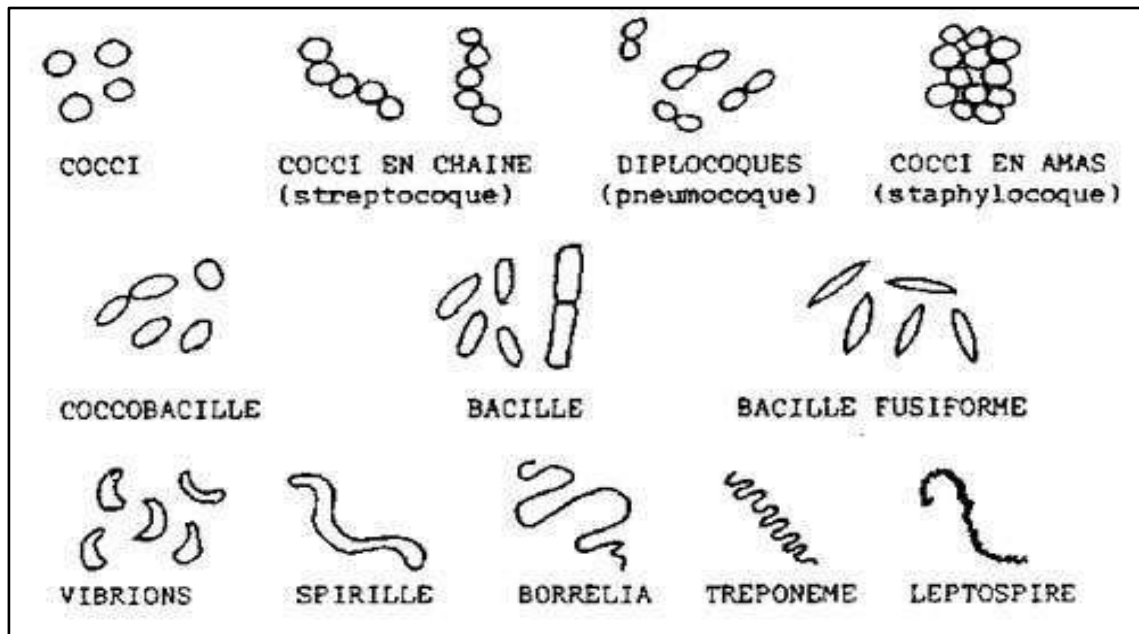


Figure 24 : Formes et modes d'association de quelques cellules bactériennes (les dessins ne sont pas à la même échelle). (Yahiaoui, 2015).

II.2. La Taille bactérienne:

Les cellules bactériennes se mesurent en micromètres, μm (anciennement microns, μ) ; $1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm}$, les cellules de *chlamydia* comptent parmi les bactéries les plus petites (environ $0,2 \mu\text{m}$) ; des cellules encore plus petites ont été décrites chez les nano bactéries. à l'autre bout de l'échelle, certains des cellules de *spirochètes* avoisinent les $250\mu\text{m}$ de long et la bactérie *epulopiscium fishelsoni*, qui habite l'intestin du poisson chirurgien (*Acanthurus nigrofuscus*) dépasse les $600 \mu\text{m}$; il s'agit cependant là des cas extrêmes ; dans la plupart des espèces, la dimension maximale de la cellule se situe entre 1 et $10 \mu\text{m}$, notez qu'il y a des petites bactéries dont la taille correspond à la limite de résolution d'un bon microscope optique, soit $0,2 \mu\text{m}$. (Paul, 2005).

II.3. Les associations cellulaires :

Associations cellulaires : une espèce bactérienne peut apparaître sous forme de cellules isolées séparées ou en groupements caractéristiques variables selon les espèces : association par paires, en amas réguliers, en chaînette, par quatre (tétrades) etc.... Cependant il faut savoir que les groupements ne sont caractéristiques qu'au sortir de l'habitat naturel de la bactérie; **exemples :**

- Les *Staphylocoques* isolés d'un pus présentent des groupements caractéristiques en « grappe de raisin ».

- Les *Streptocoques* isolés d'un lait forment des chaînettes.

Ensuite lorsque ces bactéries sont cultivées sur milieux synthétiques les groupements caractéristiques sont généralement perdus.

Dans la nature certaines bactéries vivent en groupes de cellules peu différenciées : *Cyanobactéries* qui forment des *trichomes*. (1TSBiot, 2013).

III. La structure des bactéries :

III.1. L'appareil nucléaire des bactéries :

Comme tous les protistes procaryotes, les bactéries possèdent un appareil nucléaire constitué d'acide Désoxyribonucléique (ADN) qui est le support de l'information génétique.

L'ADN chromosomique est constitué d'une double hélice d'ADN circulaire. Cette double hélice est pelotonnée, surenroulée dans le cytoplasme grâce à l'action des topoisomérases (au nombre de 4 chez les bactéries).

Déplié, le chromosome bactérien a près de 1 mm de long (1000 fois la longueur de la bactérie) et 3 à 5 nanomètres de large.

Les deux chaînes de nucléotides se répliquent selon le schéma de Watson et Crick, chaque chaîne assurant la répllication de la chaîne complémentaire selon un mode semi-conservatif.

L'analyse chimique de l'appareil nucléaire indique qu'il est composé à 80 % d'ADN (Le chromosome), à 10 % d'acide ribonucléique ou ARN (rôle de structuration) et à 10 % de protéines. Ces dernières sont représentées en particulier par les ADN polymérases qui copient les doubles brins d'ADN, les topoisomérases, surtout les ADN gyrases, qui les déroulent pour permettre l'action des polymérases, et des ARN polymérases qui assurent la synthèse des divers ARN. Les constituants de l'appareil nucléaire sont la cible d'action de plusieurs antibiotiques : les quinolones inhibent les topoisomérases et les rifamycines inhibent les ARN polymérases, tandis que les nitromidazolés entraînent la fragmentation de l'ADN chez les anaérobies stricts.

III.1.1. L'ADN extra-chromosomique :

A côté du chromosome, support de l'hérédité, la bactérie peut contenir des éléments génétiques (ADN) de petite taille (0,5 à 5% du chromosome bactérien), extra-chromosomiques. Ces éléments, appelés plasmides, ne sont pas indispensables à la vie de la bactérie dans les conditions habituelles de croissance. Ils se répliquent indépendamment et en

général plus rapidement que le chromosome bactérien. On les détecte lorsque les gènes qu'ils transportent confèrent à la bactérie de nouvelles propriétés. **(Pierre et Marie, 2003)**

III.2. Le cytoplasme bactérien :

La structure du cytoplasme bactérien est beaucoup plus simple que celle du cytoplasme des cellules eucaryotes. Le cytoplasme ne contient pas en effet de mitochondries : les enzymes transporteurs d'électrons sont localisés dans la membrane cytoplasmique. En revanche, il est particulièrement riche en ARN solubles (ARN messager et ARN de transfert) et surtout en ARN particulaire ou ribosomal.

Les ribosomes, au nombre de 15000 environ par bactérie, représentent 40 % du poids sec de la bactérie et 90 % de l'ensemble de l'ARN, ils sont la cible d'action de nombreux antibiotiques, aminosides, phénicol, cyclines, macrolides. Ils sont constitués de protéines ribosomales et d'ARN (ARNr16S, ARNr23S et ARNr5S). Ils sont classiquement divisés en 2 sous-unités : la sous-unité 30S contient de l'ARNr16S et est la cible des aminosides et des cyclines ; la sous-unité 50S est constituée d'ARNr23S et est la cible des macrolides et apparentés.

L'ensemble des constituants cytoplasmiques sont placés dans un gel colloïdal, qui contient 80 % d'eau et des substances organiques et minérales, à une pression interne considérable (5 à 20 atmosphères). **(Anonyme³)**.

III.3. La membrane cytoplasmique (membrane interne) :

Cette membrane est la limitant externe du cytoplasme. Elle est constituée d'une double couche d'unités de phospholipides (35 %) et de protéines qui lui sont associées (65 %). Certaines de ces protéines jouent un rôle dans la synthèse du peptidoglycane et sont appelées : protéines de liaison aux pénicillines (PLP) ou pénicilline-binding-protéine (PBP) car elles sont également la cible d'action des bêta-lactamines, famille d'antibiotiques à laquelle appartient la pénicilline.

La membrane cytoplasmique des bactéries se distingue de celle des cellules eucaryotes par l'absence de stérols ; elle est caractérisée par son extrême fluidité qui est liée au déplacement et à la rotation des groupements lipidiques.

III.4. La paroi bactérienne :

Malgré la forte pression osmotique (5 à 20 atmosphères) qui règne à l'intérieur du cytoplasme bactérien,

La bactérie n'éclate pas grâce à l'existence d'une structure rigide, appelée paroi, de nature polymérique. Les polymères et leur mode de liaison varient selon les espèces

bactériennes. Toutefois, une substance de base, spécifique des bactéries, est partout présente : c'est la muréine, appelée encore peptidoglycane. (Pierre et marie, 2003).

III.5. Structures inconstantes :

III.5.1. La capsule :

La capsule est un enduit excrété par certaines bactéries. Elle est habituellement de nature polysaccharidique, quoique dans le cas de *Bacillus anthracis* (le bacille du charbon) elle consiste en un polypeptide de l'acide D-glutamique.

Chez les espèces bactériennes capsulées, des mutations peuvent affecter la production de capsule : les bactéries sauvages capsulées donnent des colonies lisses (S pour « smooth ») ou muqueuses, tandis que les bactéries mutantes non capsulées donnent des colonies rugueuses (R pour « rough »).

Des variations transitoires peuvent également l'affecter puisque la production de capsule est souvent fonction de la présence de fortes concentrations de sucres ou de sérum (variation phénotypique).

La capsule joue un rôle important dans le pouvoir pathogène de certaines espèces bactériennes (*Streptococcus pneumoniae*, *Haemophilus influenzae*, *Klebsiella*, *E. coli K1*) par son rôle protecteur contre la phagocytose.

III.5.2. Les cils ou flagelles :

Les cils, ou flagelles, sont des structures inconstantes chez les bactéries. Ce sont des appendices filamenteux, composés entièrement de protéines, de 6 à 15 µm de long sur 12 à 30 nanomètres d'épaisseur. Les protéines flagellaires sont appelées flagellines.

Antigéniques (elles provoquent la formation d'anticorps que l'on peut mettre en évidence dans certains sérodiagnostics, ex. fièvre typhoïde), elles sont différentes d'une espèce bactérienne à une autre.

Les flagelles sont attachés dans le cytoplasme bactérien par une structure complexe. Ils constituent les organes de locomotion pour les bactéries qui en possèdent. Selon la disposition des flagelles, on distingue les bactéries monotriches (un seul flagelle polaire), lophotriches (une touffe de flagelles polaires) ou péritriches (flagelles répartis sur toute la surface de la bactérie).

III.5.3. Pili ou fimbriae :

De nombreuses bactéries à Gram négatif (exceptionnellement des bactéries à Gram positif) possèdent des appendices de surface plus courts et plus fins que les flagelles et que

l'on appelle pili (de *pilus* = poil), ou *fimbriae* (frange). (Mayer et al, 2004).

III.5.4. Les spores :

Les bactéries appartenant à certains genres, notamment le genre *Bacillus* et le genre *Clostridium*, sont capables de former des endospores. Les bactéries sporulées subissent un cycle de différenciation en réponse aux conditions d'environnement : en l'absence d'aliments, une spore se forme à l'intérieur de chaque bactérie et est libérée lorsque la bactérie s'autolyse.

La spore est une cellule bactérienne au repos, hautement résistante à la dessiccation, à la chaleur et aux agents chimiques.

Replacée dans des conditions nutritionnelles favorables, la spore germe et redonne une bactérie identique à celle qui lui a donné naissance. La spore est donc une forme de résistance aux conditions défavorables de vie, avec conservation de toutes les aptitudes génétiquement déterminées.

III.5.5. Le glycocalyx :

Le glycocalyx est un feutrage de fibres polysaccharidiques (exopolymère) présent à la surface des bactéries dans leur milieu naturel. Chez certaines espèces bactériennes des quantités importantes de glycocalyx sont synthétisées (cas de *Pseudomonas aeruginosa* ou de *Streptococcus mutans*) et engluent les cellules bactériennes. Le glycocalyx est alors appelé « slime ». (Pierre et Marie 2003).

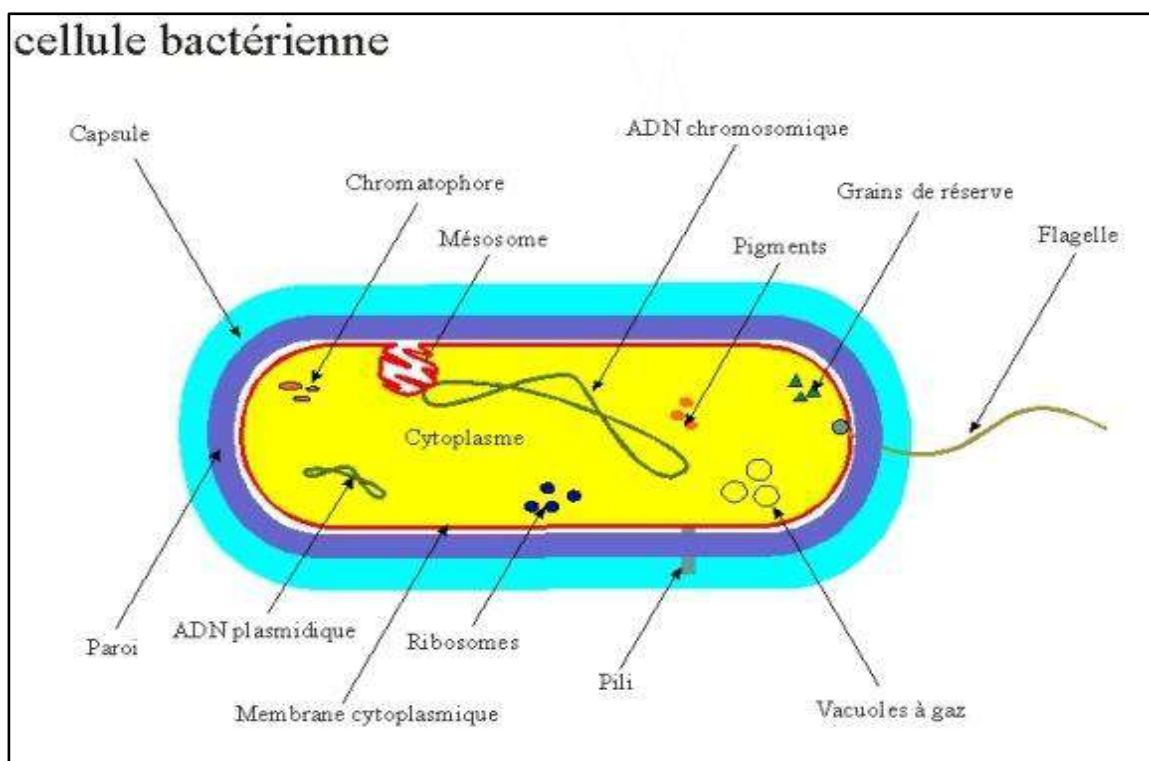


Figure 25 : schéma d'une cellule bactérienne (Mayer, 2004)

IV. Classification des bactéries :

Tableau 01: des principes Bactéries (Nomenclature for Aérobie and facultative bacteria. 1999.)

Bactéries aérobies		
	Gram positif	Gram négatif
Cocci	<p>-Staphylococcus :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Staphylococcus aureus</i> (méti-R et méti-S) • <i>Staphylocoque</i> à <i>coagulase négative</i> <p>-Streptococcus :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Streptocoque</i> <i>bêta-hémolytique</i> ▫ <i>Streptococcus pyogenes</i> (groupe A), ▫ <i>S. agalactiae</i> (groupe B) ▫ <i>S. dysgalactiae</i> (groupe C) • <i>S. pneumoniae</i> • <i>Autres streptocoques</i> ▫ <i>S. mutans</i>, <i>S. oralis</i>, <i>S. salivarius</i>, <i>S. sanguis</i>, <i>complexe « milleri »</i> (<i>S. anginosus</i>, <i>S. constellatus</i>, <i>S. intermedius</i>), <i>S. gallolyticus</i>(<i>ex S. bovis</i>) <p>-Enterococcus :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Enterococcus faecalis</i>, • <i>E. faecium</i> 	<p>- Neisseria :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>N. gonorrhoeae</i> • <i>N. meningitidis</i>

Bactéries aérobies		
	Gram positif	Gram négatif
BACILLES	<p>-Bacillus:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Bacillus anthracis</i> - <i>Corynebacterium</i> - <i>Erysipelothrix</i> - <i>Listeria</i> - <i>Nocardia</i> - <i>Tropheryma whippelii</i> 	<p>-Entérobactéries:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Citrobacter</i> • <i>Enterobacter</i> • <i>Escherichia coli</i> • <i>Klebsiella</i> • <i>Proteus</i> • <i>Salmonella</i> <ul style="list-style-type: none"> ◦ <i>Salmonella typhimurium</i> • <i>Serratia</i> • <i>Shigella</i> <ul style="list-style-type: none"> ◦ <i>Shigella sonnei</i> • <i>Yersinia</i> <ul style="list-style-type: none"> ◦ <i>Yersinia enterocolitica</i> <p>-Coccobacilles:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Bartonella</i> • <i>Branhamella</i> • <i>Brucella</i> ◦ <i>Brucella abortus</i> • <i>Campylobacter</i> • <i>Coxiella</i> • <i>Francisella</i> • <i>Haemophilus</i> • <i>Helicobacter</i> • <i>Kingella</i> • <i>Legionella</i> • <i>Moraxella</i> ◦ <i>Moraxella catarrhalis</i> • <i>Rickettsia</i> <p>- Autres bacilles à Gram négatif :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Acinetobacter</i> • <i>Aeromonas</i>

		<ul style="list-style-type: none"> •<i>Bordetella</i> •<i>Burkholderia</i> •<i>Pasteurella</i> •<i>Pseudomonas</i> •<i>Stenotrophomonas</i> •<i>Vibrio</i>
--	--	--

Bactéries anaérobies		
Gram positif	Gram négatif	
<ul style="list-style-type: none"> - <i>Actinomyces</i> - <i>Clostridium</i> : <i>C. botulinum</i>, <i>C. difficile</i>, <i>C. perfringens</i>, <i>C. tetani</i> - <i>Peptococcus</i> - <i>Propionibacterium acnes</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Bacteroides</i> - <i>Eubacterium</i> - <i>Fusobacterium</i> - <i>Porphyromonas</i> - <i>Prevotella</i> 	
Autres Bactéries		
Spirochètes	Mycobactéries	Autres
<ul style="list-style-type: none"> - <i>Borrelia</i> - <i>Leptospira</i> - <i>Treponema</i> • <i>Treponema pallidum</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>M. avium</i> - <i>M. africanum</i> - <i>M. leprae</i> - <i>M. kansasii</i> - <i>M. tuberculosis</i>- <i>Mycobacteries</i> 	<ul style="list-style-type: none"> -Intracellulaires : <i>Chlamydia</i> • <i>Chlamydia psittaci</i> -Sans paroi (mollicutes) : - <i>Mycoplasma</i>, <i>Ureaplasma</i>

V. Différents bactéries gram et sa coloration :

V.1. La coloration de Gram :

Les différences de constitution et de structure chimique des parois Gram (+) et Gram (-) permettent d'établir le principe de la coloration élaborée par Christian GRAM (1884) :

Procédure de la coloration de Gram :

Après fixation du frottis on colore avec le violet de gentiane. On rince avec de l'eau. On rajoute un fixateur qui est le Lugol. On rince avec de l'eau distillée. On procède ensuite à une étape de décoloration par un mélange d'alcool et d'acétone. Ce dernier pénètre dans les bactéries Gram négatives et non dans les bactéries Gram positives dont les pores ont fermés par déshydratation par l'alcool. On rince et on procède à une contre coloration à la safranine. Les Gram positives vont apparaître violets et les Gram négatives roses.

V.2. Principaux constituants chimiques de la paroi :

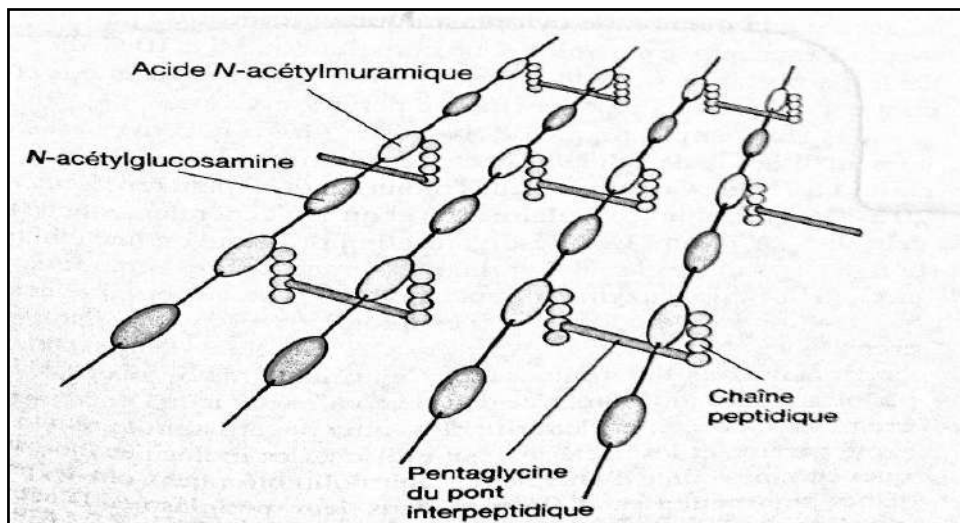


Figure 26 : Dessin schématique du peptidoglycane (Yahiaoui, 2015).

La chaîne polysaccharidique:

Faite d'une alternance de molécules de N-acétylglucosamine (NAG) et d'acide N-acétylmuramique (NAM). Les chaînes latérales peptidiques identiques, composés de 4 acides aminés (tétrapeptide), attachées aux NAM.

Chez les Gram positifs, un ensemble de ponts « inter-peptidiques » (pentapeptide) qui partent du 4^e acide aminé du tétrapeptide vers le 3^e acide aminé du tétrapeptide d'une seconde chaîne polysaccharidique et ainsi de suite.

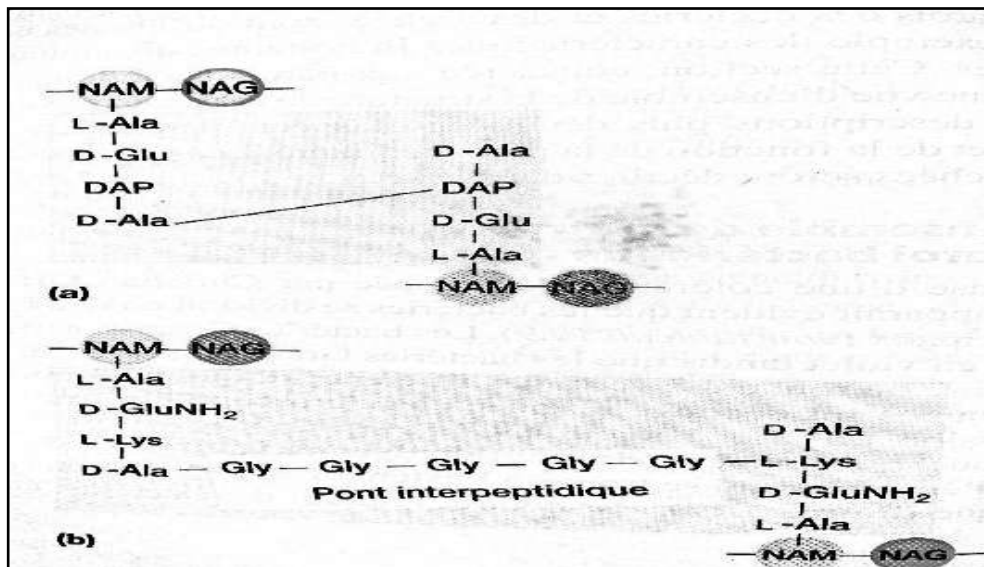


Figure 27 : Organisation du térapeptide et du pentapeptide a) Gram -, b) Gram +

V.3. Structure moléculaire de la paroi des Gram négatives et positives

V.3.1. Paroi des Gram positifs :

- Le peptidoglycane est le constituant majeur (90%).
- Le reste correspond à un feutrage d'acides téichoïques (10%).
- Le peptidoglycane est très solide, les liaisons croisées entre chaînes glucidiques sont nombreuses.
- Présence de flagelles.

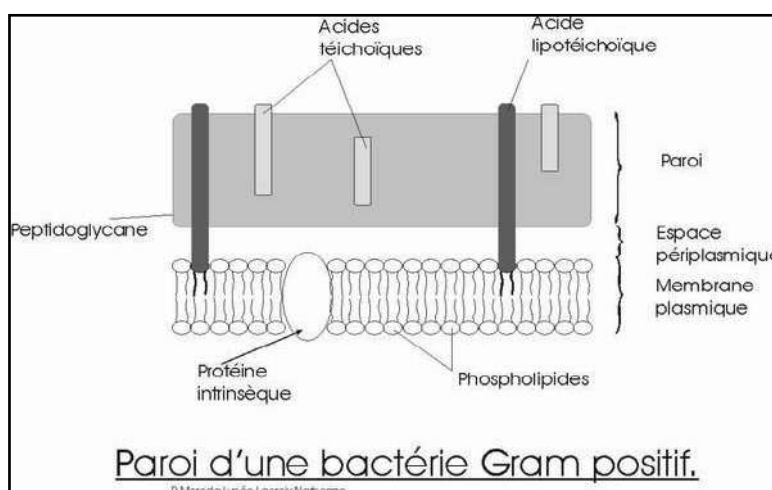


Figure 28 : structure moléculaire de la paroi des Gram positifs (Yahiaoui, 2015).

Les Gram (+) excrètent plutôt les enzymes hors de la cellule. Ce sont alors des « exoenzymes ». Celles des Gram – sont retenues entre les membranes interne et externe. (Yahiaoui, 2015).

V.3.2. Paroi des Gram négatifs :

Beaucoup plus complexe, elle est constituée du peptidoglycane et de la membrane externe. Il y a plusieurs couches :

- Peptidoglycane en couche mince.
- Phospholipides
- Lipopolysaccharides (LPS) : formé de 3 parties :
 - Le lipide (A) couplé à la glucosamine et à des résidus phosphore qui est amphiphile, possédant une partie hydrophobe et un hydrophile.

Il y a une analogie entre les appellations « endotoxine », « lipide A » et « membrane externe ».

- Le polysaccharide central, constitué de 10 sucres.
- La chaîne latérale O, ou antigène O, chaîne courte, sa composition varie selon la souche bactérienne.

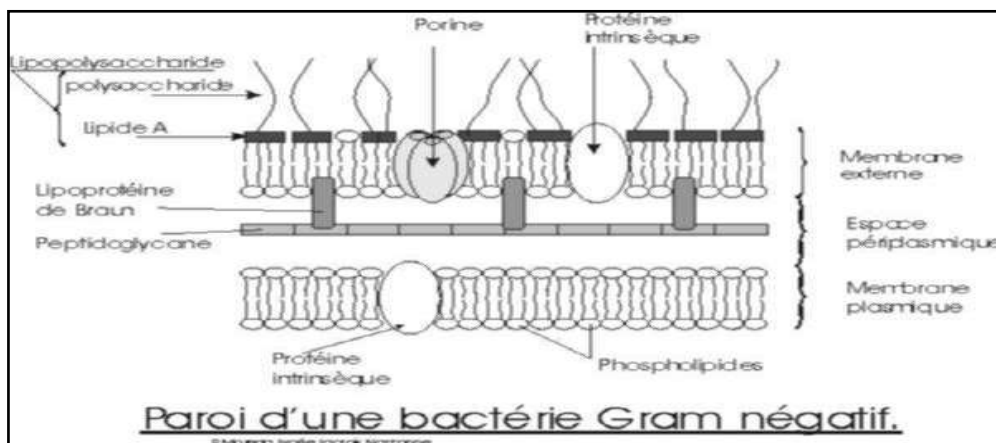


Figure 29 : structure moléculaire de la paroi des Grams négatifs. (Yahiaoui, 2015)

VI. La taxonomie bactérienne :

VI.1. Intérêt d'une taxonomie bactérienne :

La taxonomie bactérienne a pour but d'établir des groupes de bactéries présentant des caractères communs, les taxons, auxquels elle va attribuer un nom. Son application principale est l'identification qui consiste à étudier les caractères d'un organisme afin de pouvoir le placer dans un taxon préalablement décrit ou dans un nouveau taxon. Il n'existe pas de Classification officielle des procaryotes, d'une part parce que la taxonomie poursuit des buts Pratiques et, selon l'application voulue, plusieurs classifications peuvent coexister. Par exemple, pour des raisons pratiques et/ou didactiques, les bactéries d'intérêt médical ou vétérinaire peuvent être classées selon leurs caractères phénotypiques or cette classification

est différente de celle adoptée par la deuxième édition du ‘Bergey's Manual of Systematic Bacteriology’, mais elle ne peut être considérée comme fautive ou désuète; elle a simplement un objectif qui n'est pas celui du ‘Bergey's Manual’. D'autre part, la taxonomie étant une science dynamique en perpétuel bouleversement, elle est sujette à de nombreux changements en fonction des données disponibles et elle va suivre l'évolution des techniques d'identification bactérienne. De plus, les opinions des bactériologistes sont divergentes.

Enfin, l'absence de définition précise des rangs hiérarchiques est un obstacle majeur à une taxonomie universelle. Il faut également se rappeler que nous ne connaissons encore qu'un faible pourcentage des espèces bactériennes existantes. Il n'y aura donc jamais de classification définitive.

Les premiers essais de classification des microorganismes remontent aux travaux de Muller en 1773 qui les répartissaient en deux groupes différents : *Vibrio* et *Monas* sur des critères de Mobilité. Par la suite, l'invention de la coloration de Gram en 1883 a permis de diviser le monde bactérien en bactéries à Gram négatif et bactéries à Gram positif. A ses débuts, la taxonomie bactérienne suivait les règles édictées pour la classification des organismes supérieurs (végétaux et animaux), en s'appuyant sur l'étude du phénotype exprimé et sur les variations morphologiques existant entre les bactéries. Progressivement, il a été reconnu que la classification bactérienne devait également refléter le plus fidèlement possible les relations naturelles entre les bactéries car ces dernières présentent des relations de parenté ou de phylogénie. Ces relations phylogénétiques entre les espèces ont été difficiles à appréhender mais, comme décrit dans les paragraphes précédents, les progrès de la biologie moléculaire ont permis d'estimer l'évolution bactérienne à l'aide de marqueurs qualifiés "d'horloges moléculaires universelles".(Henri,2009).

VI.2. Caractères utilisés pour la classification des bactéries :

Certaines des méthodes décrites ci-dessous sont classiquement utilisées en taxonomie bactérienne parce qu'elles sont considérées comme des méthodes de référence (hybridation ADN-ADN, détermination du G+C%, séquençage du gène de l'ARNr 16S) et/ou parce qu'elles sont aisées à mettre en place. D'autres sont beaucoup moins utilisées, soit de par leur lourdeur et/ou leur coût (analyse des esters méthyles d'acides gras, composition du peptidoglycane, ...), soit parce qu'elles ne sont applicables qu'à certains groupes bactériens (détermination des métabolites terminaux ou des profils protéiques, ...), soit parce qu'il s'agit de techniques nouvelles et/ou mal connues de l'ensemble de la communauté scientifique

(spectrométrie de masse, détermination du squelette rrn, séquençage de nouveaux gènes de ménages, ...).

Chacune de ces méthodes apportera des informations particulières applicables à des niveaux taxonomiques variables. (Fig 52) montre le niveau d'information taxonomique de certaines techniques. Selon les groupes étudiés, le pouvoir discriminant de chaque technique peut se déplacer vers la gauche ou la droite. (Henri, 2009).

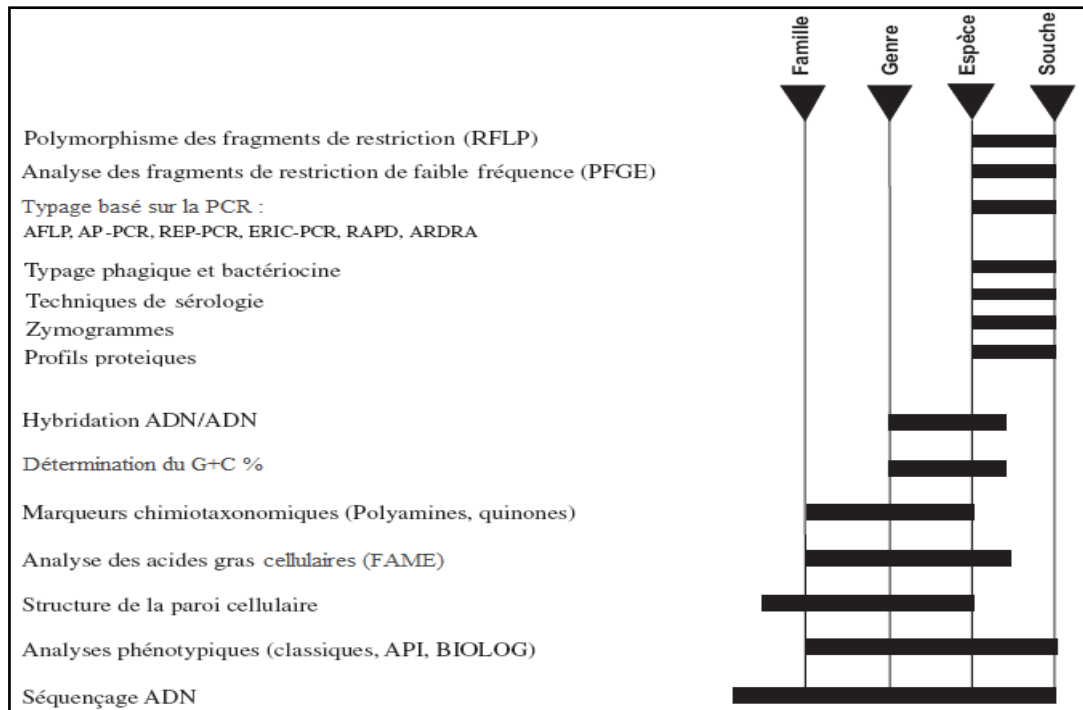


Figure 30 : Pouvoir discriminant de certaines techniques pouvant être utilisées dans une approche taxonomique mixte et consensuelle. (Henri, 2009).

VI.2.1. Nom des bactéries Une bactérie est définie par:

Le genre L'espèce : 1ère lettre en majuscule

L'espèce : Pas de majuscule

Une bactérie est aussi incluse dans une famille et un ordre (en italique, 1ère lettre en majuscule) Ex: *Escherichia coli*, famille des *Enterobacteriaceae*.

VI.2.2. Méthodologie :

❖ Classification phénotypique :

- Tests biochimiques: enzymes, assimilation,
- fermentation Morphologie (Gram, forme, mobilité).

- Structure de molécules: chimiotaxonomie (lipides, protéines).

❖ **Classification géotypique :**

-Détermination de groupes génomiques.

-Détermination des filiations (évolution) par études phylogéniques.

VI.2.3. Classification phénotypique simple :

Tests biochimiques simples et en nombre réduits (fermentation de sucres, utilisation de composés carbonés, caractères de croissance) :

-très subjectif (pour le choix des tests et leur lecture)

-peu fiables (une mutation ponctuelle peut survenir).

VI.2.4. Classification phénotypique complexe :

Taxonomie basée sur l'analyse d'un nombre important de caractères biochimiques selon plusieurs méthodes:

- Méthode dite de « pas à pas », chaque caractère engendre une dichotomie dont l'aboutissement rassemble des souches avec tous les caractères communs. Mais risque d'erreur si une mutation.
- Analyse factorielle: chaque souche est positionnée dans un espace 2D des variables en fonction de ses caractères.

VI.2.5. Classification phénotypique, chimiotaxonomie :

- Étude de molécules qui résultent d'une série de réactions enzymatiques et donc de l'expression de plusieurs gènes (contre un seul pour de nombreux tests simples).
- Paroi: Acides gras, acides aminés,
- sucres Membrane cellulaire lipides
- Cellule: protéines.

VI.2.6. Taxonomie génomique :

Plusieurs approches, souvent complémentaires :

Étude du génome complet:

- G+C %
- hybridation ADN/ADN total
- polymorphisme de restriction de l'ADN total
- Séquençage du génome
- Étude d'une portion du génome

- Polymorphisme de restriction d'une portion d'ADN
- Séquençage de gènes
- G+C % de l'ADN Composition en bases de l'ADN varie d'un organisme à l'autre (Chargaff, 1949).
- $G+C \% = \frac{G + C}{G + C + A + T} \times 100$.

Détermination :

- Densité de l'ADN
- Température de demi-dénaturation (T_m).
- Chromatographie des nucléotides après hydrolyse complète de l'ADN: CCM, HPLC, électrophorèse capillaire
- Variation entre 25 et 75 % entre les espèces, ne doit pas être différent de plus de 3 % à l'intérieur d'une espèce
- Peu utile, phylogénie grossière: haut G+C %, bas G+C % pour les Gram +.

VI.2.7. Hybridations ADN/ADN :

- « gold standard » pour la détermination des espèces.
- Estimation de la similarité de deux ADN
- même espèce: > 70 %
- même genre: 1 à 60%
- genres différents: < à 5 %
- Possibilités d'évaluer la solidité des hybrides en mesurant les T_m de chacun des hybrides (homologues et hétérologues). (Hamon, 2014).

VII. La vie bactérienne :**VII.1. Mode de vie des bactéries : le biofilm**

Deuxième surprise, dans la nature, les bactéries sont assez rarement libres dans un milieu liquide (sauf au milieu des océans). Très souvent elles sont fixées à tout ce qui peut servir de support, sous forme de biofilm.

Un biofilm est un ensemble de bactéries, pas forcément de la même espèce, fixées à un support à l'intérieur d'une sorte de ganguie formée par des filaments, du mucus et des protéines, fabriqués par les bactéries elles-mêmes.

À l'intérieur de ces biofilms, les bactéries peuvent être très différentes de ce qu'elles sont quand on les cultive en laboratoire (pour celles, bien sûr que l'on peut cultiver). Mais de

plus, il est particulièrement difficile de distinguer l'intérieur et l'extérieur des bactéries. Par exemple, la gangue qui entoure le biofilm, formée de productions bactériennes, parfois libérées hors de la membrane, comme les vésicules, parfois liés au corps bactérien comme les pilis et les flagelles, font-ils partie de l'intérieur ou de l'extérieur.

Les cinq étapes du développement d'un biofilm sur une surface dure (**fig 53**) :

Étape 1 : attachement initial ;

Étape 2 : attachement irréversible ;

Étape 3 : apparition et maturation I du biofilm ;

Étape 4 : maturation II ;

Étape 5 : dispersion.

Les photomicrographies (toutes à même échelle) sont celles d'un biofilm de *Pseudomonas aeruginosa* en développement.

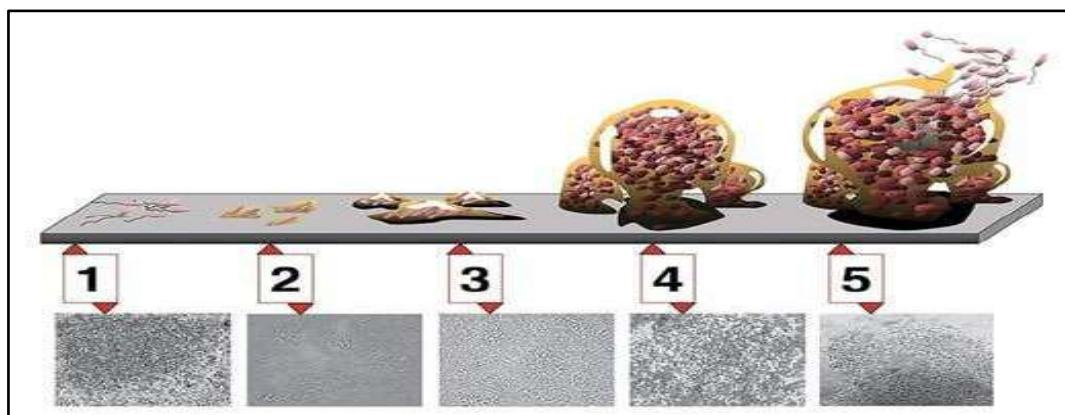


Figure 31 : image présente les cinq étapes du développement d'un biofilm (futura-science,2019).

Les bactéries en croissance ne sont pas toutes identiques. Des chercheurs sont ensuite, (en 2000, précisément) allés regarder de plus près ce qui se passe dans une culture pure, en laboratoire et là, nouvelle surprise : avec des techniques plus précises (marquage à la GFP et cytométrie de flux), ils ont découvert que même dans ces conditions, les bactéries en croissance ne sont pas toutes identiques. À nouveau on peut dire, « une bactérie, ça n'existe pas », parce que ces différences indiquent que l'unité de fonctionnement est la population (si elles sont toutes de la même espèce), ou la communauté (lorsqu'elles appartiennent à des espèces différentes). Cette unité de fonctionnement ne ressemble certes pas à un métazoaire, les bactéries ne sont pas les cellules d'un organisme multicellulaire, mais ce ne sont pas non

plus des organismes indépendants, tous identiques. On doit les penser comme des éléments relativement peu autonomes, constituant des populations en interaction constante et réciproque entre elles et avec leur environnement.

Des vésicules, formées à partir de la membrane externe de certaines bactéries, et contenant des protéines spécifiques, se séparent de cette membrane et migrent à l'extérieur. (fig54). (Anonyme⁴).

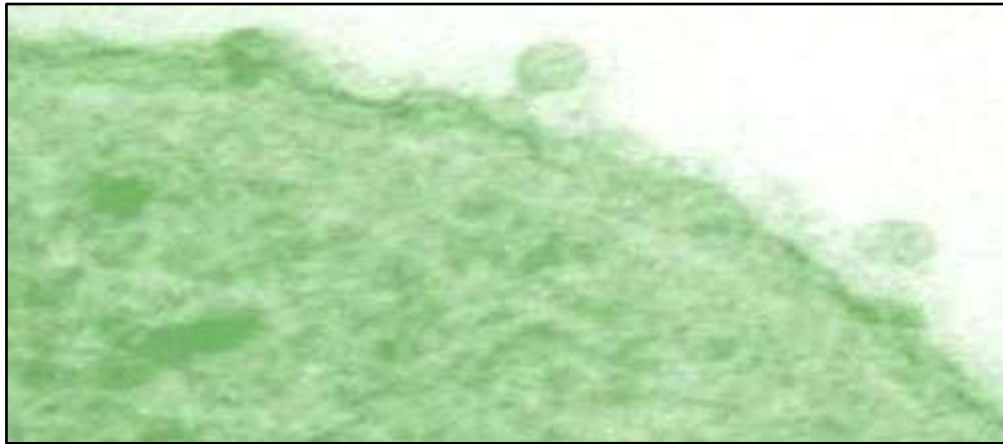


Figure 32 : formation des vésicules à partir de membrane externe de certaines bactéries (Janin, 2019).

VII.2. La capacité de vivre dans des conditions très différentes :

Certaines bactéries sont inféodées à un seul milieu. Souvent ce sont celles qui vivent dans des conditions extrêmes, de température par exemple, ou qui sont parasites ou symbiotes de certains organismes, comme ces vers qui vivent au fond des fosses océaniques, et dont l'énergie est fournie par la « respiration anaérobie » (au lieu de réduire de l'O₂ en libérant de l'H₂O, la respiration anaérobie réduit par exemple un nitrate NO₃⁻ en nitrite NO₂. Cela génère beaucoup moins d'énergie) de bactéries symbiotes.

Mais un grand nombre d'entre elles possèdent la capacité de vivre dans des conditions très différentes, comme la célèbre bactérie *Escherichia coli*, hôte habituelle de nos intestins, et bactérie modèle ayant servi à la majorité des études scientifiques concernant le fonctionnement du génome bactérien. En présence d'oxygène qu'elle respire, elle est capable d'utiliser comme source de carbone et d'énergie des sucres très divers, (dont le lactose, qui a fait sa célébrité), ou encore des acides aminés... Mais elle peut aussi vivre en anaérobiose (en absence d'O₂), soit en « respirant » du nitrate ou du fumarate, soit en fermentant divers sucres.

Tous ces métabolismes nécessitent des enzymes différents, même si le cœur du métabolisme reste constant. Comment de si petites cellules peuvent-elles fabriquer tant d'enzymes différents, et dont la plupart ne lui servent à rien dans chacun des milieux qu'elle est susceptible de coloniser. Bien sûr, l'évolution a trouvé la solution. Chaque type de milieu « induit » la synthèse des enzymes qui lui sont nécessaires, et « réprime » la synthèse de celles qui ne lui servent plus (**Janine, 2019**).

Chapitre III

Le climat

I. Introduction :

Depuis des millénaires, le climat de la Terre varie selon les époques et les lieux. Les changements observés s'étalent généralement sur des longues périodes qui atténuent la perception que l'homme peut en avoir à un moment donné. Au cours des dernières décennies cependant, les changements climatiques semblent s'être accélérés.

Dans ces conditions, il n'est pas surprenant que le public s'interroge sur la réalité de ces changements, leurs causes, leur devenir et, plus encore, leurs conséquences immédiates et lointaines sur les modes de vie, la santé, les écosystèmes et l'économie. **(Jean et al, 2010).**

II. Définition de climat :

Le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques (température, pression atmosphérique, vents, précipitation) qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et son évolution en un lieu donnée **(Hamel, 2014).**

Ils existent plusieurs définitions du climat, certaines tiennent compte de l'action directe ou indirecte du milieu atmosphérique sur les êtres vivants, mais on peut dire que le climat est la distribution statistique des conditions de l'atmosphère terrestre dans une région donnée sur une période donnée. La connaissance du climat est faite à partir de paramètres statistiques simples ou évolués calculés sur des mesures ponctuelles des éléments climatiques comme la température, la pluviométrie **(JARA, 2016).**

Le climat caractérise l'état moyen de nombreux paramètres, principalement physiques, de l'atmosphère, de l'océan et des surfaces continentales. Le mot « climat » dérive du grec qui signifie « inclinaison », en référence à l'inclinaison des rayons solaires commune aux régions de climat semblable. De manière usuelle, le climat désigne la moyenne, calculée sur une longue période de temps (30 ans, par convention, pour les météorologistes), des observations de paramètres tels que la température, la pression, la pluviométrie ou la vitesse du vent, en un lieu géographique et à une date donnés **(Jean, 2013)**

III. Les climats du passé :

Le climat varie naturellement. L'histoire climatique de la Terre est chahutée, avec des épisodes chauds et des épisodes froids. La question qui est régulièrement posée aux climatologues est de savoir si l'augmentation de température observée depuis un siècle est vraiment imputable à l'homme ou si elle n'est pas une manifestation de la variabilité naturelle du climat. Il est donc important de connaître les détails des climats passés et de comprendre pourquoi et comment ils ont pu varier. **(CEA, 2013).**

Ainsi, Ferdinand II de Médicis, en plein XVII^e siècle, mettait en place un réseau d'observations. Mais il faudra attendre la mise au point d'instruments fiables pour entrer dans une véritable étude scientifique du climat. Certaines découvertes viendront appuyer la démarche : ainsi une présentation des vents alizés (Edmund Halley, 1686) qui sera pleinement développée grâce au physicien et mathématicien français Gustave Coriolis (1792 - 1843) expliquant la trajectoire des alizés ainsi que celles des courants marins (**Bertrand, 2013**).

On a compris au milieu du XIX^e siècle, grâce au naturaliste suisse Louis Agassiz, que la Terre avait connu des glaciations. On sait maintenant qu'elle a subi au cours du dernier million d'années une succession d'épisodes glaciaires entrecoupés de périodes chaudes (comme actuellement) généralement assez brèves.

Lors des grandes glaciations, les continents aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord étaient recouverts de plusieurs kilomètres de glace.

L'histoire de ces épisodes est elle-même assez perturbée avec, au Groenland, des variations locales de température de 15°C en quelques décennies. Il est important pour les climatologues de comprendre ces diverses évolutions. Il est très utile pour les modélisateurs d'avoir une connaissance bien documentée de tels épisodes sur lesquels ils pourront tester la capacité de leurs modèles à reproduire des climats réels très différents de l'actuel. (**CEA, 2013**).

IV. Les différents types des climats au monde :

La Terre connaît une multitude de climats, du climat Polaire des hautes latitudes au climat Equatorial de l'Equateur. Toute cette palette du climat génère une biodiversité très importante, ce qui fait d'ailleurs tout le charme de notre planète. (**Safa, 2013**)

IV.1. Le climat tropical :

Le climat tropical est intermédiaire entre les climats équatorial et aride. Il est marqué par deux saisons, l'une sèche, l'autre pluvieuse (durant au moins trois à quatre mois) avec une chaleur constante tout au long de l'année (température moyenne rarement inférieure à 18 °C). Ce climat est également caractérisé par des vents d'est, les alizés.

IV.2. Le climat Subtropical :

Le climat Subtropical se rencontre sous les latitudes tropicales et subtropicales, il se caractérise par une saison sèche et une saison des pluies, ces 2 saisons sont très marquées, les températures sont relativement élevées toute l'année. Dans cette zone la faune et la flore sont aussi très présentes. (**Nathalie, 2021**).

IV.3. Le climat Equatorial :

Le climat Equatorial se rencontre comme son nom l'indique le long de l'Equateur, il se caractérise par des températures élevées et des précipitations importantes pendant la plus grande partie de l'année. Le rayonnement solaire varie peu ou pas pendant l'année. Tout ceci permet à la vie de trouver des conditions idéales à son épanouissement, dans ce biotope on ne trouve pas moins de 50% de la biodiversité Terrestre. (Safa, 2014)

IV.4. Le climat Aride :

Le climat Aride donne naissance à des déserts, la pluviométrie annuelle étant plus faible que l'évaporation, le soleil est très souvent présent ce qui permet aux températures d'être très élevées en journée, mais de baisser énormément la nuit, le gel dans le désert n'a rien d'étonnant. La vie arrive quand même à trouver son chemin dans cet environnement inhospitalier.

IV.5. Le climat Semi-aride :

Le climat Semi-aride se présente sous l'aspect d'immenses étendues d'herbe et de savanes, les précipitations s'échelonnent de 250 à 500mm, elles sont réparties inégalement dans une année et on distingue une saison des pluies et une saison sèche.

IV.6. Le climat Méditerranéen :

Le climat Méditerranéen se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers doux et pluvieux, le climat Méditerranéen est dominé par le maquis ou la brousse. Des épisodes de pluies très intenses peuvent avoir lieu en automne ou en hiver.

IV.7. Le climat océanique :

Le climat océanique se définit par les températures plutôt constantes tout au long de l'année. Hiver comme été, les températures restent plutôt douces. L'amplitude thermique annuelle y est faible. Elle ne dépasse pas la petite vingtaine de degrés. Lorsqu'elle s'approche des 10 °C, sur le littoral, on parle même de climat hyperocéanique.

Les saisons sont donc assez peu marquées. Les précipitations, quant à elles, se répartissent tout au long de l'année avec un maximum en automne et en hiver tout de même. (Nathalie, 2021).

IV.8. Le climat Tempéré :

Le climat Tempéré se caractérise par des précipitations bien réparties tout au long de l'année et par quatre saisons bien distinctes.

Il existe des variabilités dans ce climat suivant la position par rapport à l'océan, la végétation se présente sous des forêts d'arbres à feuillage caduc.

IV.9. Le climat Continental :

Le climat Continental a des saisons marquées par des écarts de température considérables, ainsi l'hiver souvent très froid succède à un été chaud. Les précipitations sont globalement faibles, elles sont le plus abondantes en été. (Safa, 2014).

IV.10. Le climat montagnard :

La température de l'air, en montagne, diminue d'environ 0,6 °C tous les 100 mètres. Mais la forme du relief modifie localement la répartition des températures. Par temps calme, l'air froid, plus dense que l'air chaud, s'accumule dans le fond des vallées encaissées. La température de l'air à quelques centaines de mètres au-dessus de la vallée est alors supérieure à celle du fond (Anonyme⁵).

IV.11. Le climat Polaire :

Le climat Polaire se caractérise par un hiver où on ne voit pratiquement pas le jour (la nuit polaire), les températures y sont très froides et la banquise se forme, les précipitations sont faibles tout au long de l'année, l'été est très frais et court.

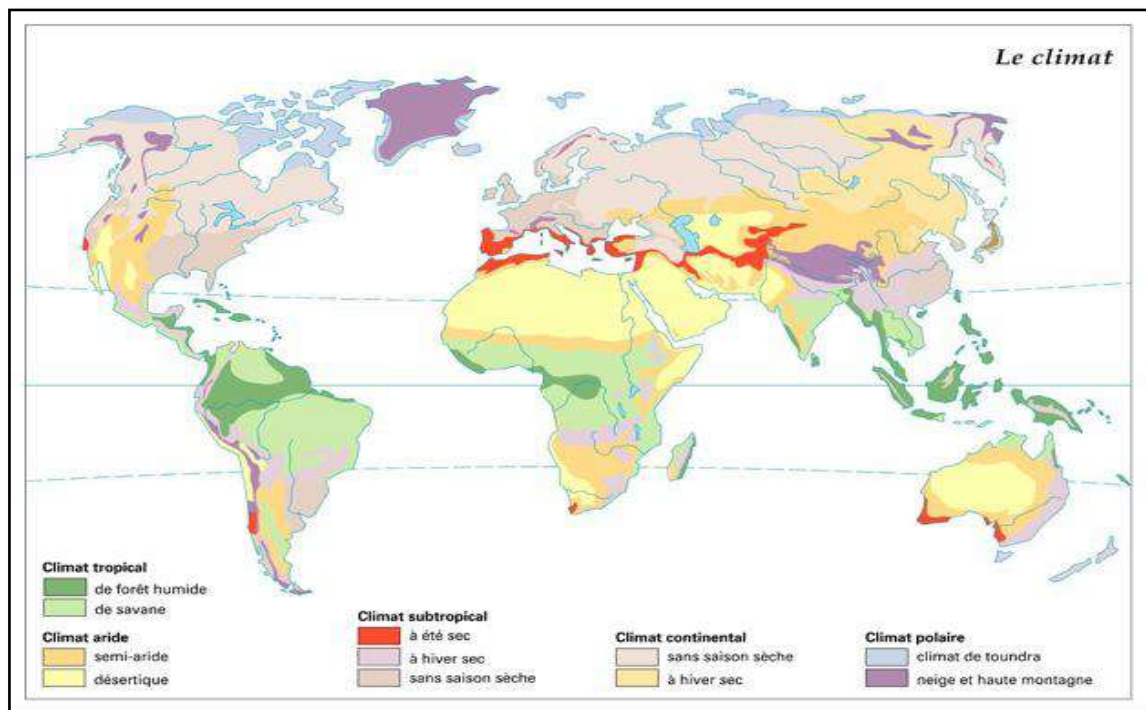


Figure 33: Carte simplifiée des climats mondiaux (Michel Mazoyer - Archives Larousse).

Ces grandes caractéristiques sont associées au premier ordre aux caractéristiques latitudinales et saisonnières du rayonnement solaire et des grandes cellules de circulation atmosphérique qui redistribuent l'énergie et l'eau entre les régions sources et les régions puits. Cette carte ne donne toutefois qu'une approximation grossière de la variété des climats. (Jeane et Pascale, 2021).

V. Les Facteurs climatiques :

L'ensemble des facteurs climatiques à considérer peuvent être classés en trois différentes catégories :

V.1. Les Facteurs énergétiques :**V.1.1. Rayonnement solaire :**

C'est le facteur le plus important en matière de dynamique agroclimatique, Le rayonnement en provenance du Soleil pénètre dans l'atmosphère et va y subir des interactions avec les différentes sphères (hydrosphère, cryosphère, biosphère etc.). Une partie du rayonnement va être réfléchi sur et dans l'atmosphère et retourne dans l'espace sous rayonnement infrarouge. Une autre partie sera absorbée par les composants de l'atmosphère. Le reste qui atteint le sol sera aussi en partie absorbé et réfléchi.

La quantité d'énergie reçue par haute atmosphère sur une surface de 1 m² est de 342 ± 20 Watts. Cette valeur est nommée constante solaire. La Terre reçoit donc une certaine quantité d'énergie de la part du soleil. Cette énergie, transportée par un rayonnement électromagnétique, est transformée en chaleur. Nous étalerons ci-dessous les phénomènes qui sont fondamentaux pour le fonctionnement du système climatique (**fig37**).

V.1.1.a. Absorption du rayonnement :

Au total, c'est 20 % de l'énergie incidente qui est ainsi absorbée, dont environ 3 % par les nuages. Bien entendu, cette énergie n'est pas perdue : elle est transformée en chaleur et contribue à élever la température des différents gaz ayant absorbé ce rayonnement.

V.1.1.b. Diffusion du rayonnement :

La plus grande partie est dirigée vers le sol (23% du rayonnement incident). Une autre partie, retournée vers l'espace (environ 3%), est perdue pour le système climatique.

V.1.1.c. Réflexion du rayonnement :

En définitive, si l'on tient compte des chiffres ci-dessus (**fig37**), il ne parvient au sol que 58% du rayonnement solaire incident. Encore doit-on tenir compte de la réflexion sur les surfaces claires du globe (glaces polaires et zones désertiques), qui renvoient vers l'espace 9% du rayonnement incident, ce qui n'en laisse effectivement que 49% pour chauffer le sol. (**Rouabhi, 2019**).

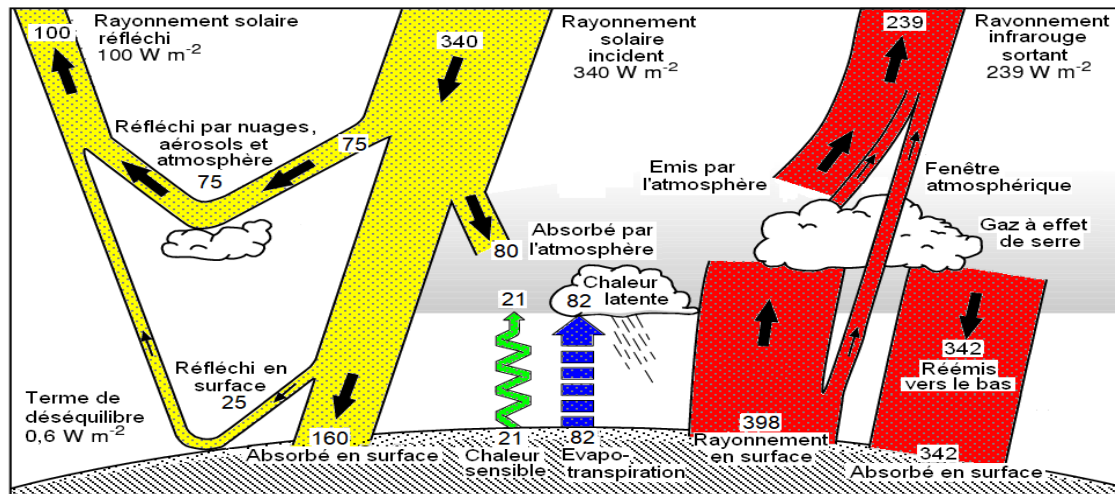


Figure 34 : Bilan énergétique terrestre) (CEA, 2013).

V.1.2. Le facteur lumière (éclairage) :

C'est l'intensité de l'énergie lumineuse qui provient des rayonnements solaires et qui sont utilisés par l'ensemble des écosystèmes biotope / biocénose. Il y a souvent une relation entre l'éclairage et la température.

L'éclairage en un point quelconque est variable, il dépend de l'angle qui fait la direction du rayonnement solaire avec la surface du sol (angle d'incidence). Il est fonction de l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée. ; Toutes ces données seront dépendant aussi de certains facteurs comme la latitude et de l'altitude. (Anonyme⁶).

V.1.3. Température :

Ensemble des conditions atmosphériques, variables, traduites subjectivement en sensations relatives de chaud et de froid, et dont l'appréciation exacte est fournie par le thermomètre.

La notion de température trouve son origine dans les sensations de chaud ou de froid que nous éprouvons lorsque nous sommes en contact avec des objets, que nous les touchions ou qu'ils nous enveloppent (comme l'air).

La température se mesure avec un thermomètre, elle est exprimée en degrés Celsius (= centigrade : °C) ou Fahrenheit (°F) ou Kelvin (K).

- 0°C = congélation de l'eau au niveau de la mer
 - 100°C = ébullition de l'eau au niveau de la mer
- Les formules de conversions :
- Fahrenheit (°F) ; 32°F = 0°C, 100°F = 38°C

$$T (^{\circ}\text{C}) = (\text{F}-32) \cdot 5/9$$

$$T (^{\circ}\text{F}) = (9/5 \cdot C) + 32$$

➤ Kelvin(K) ; 0K = -273.15°C : zéro absolu (pas de températures Kelvin négatives)

$$273,15\text{K} = 0^{\circ}\text{C} ; 288,15\text{K} = 15^{\circ}\text{C} ; 373,15\text{K} = 100^{\circ}\text{C}$$

$$T(\text{K}) = 273,15 + T(^{\circ}\text{C})$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$$

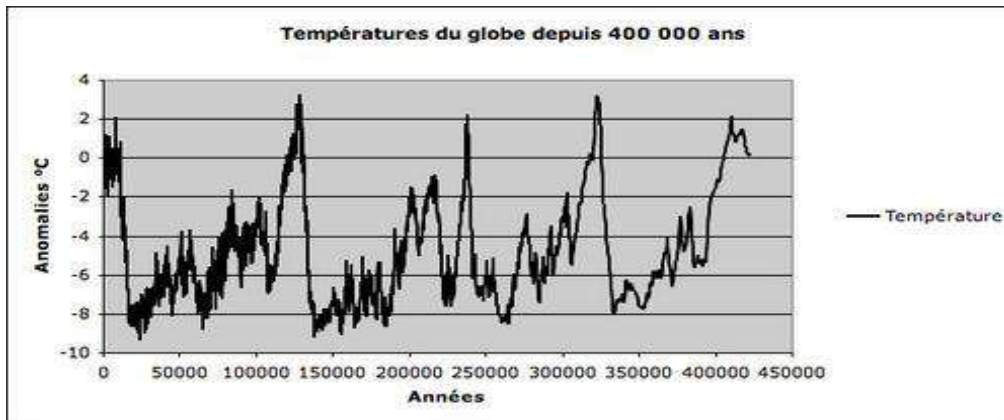
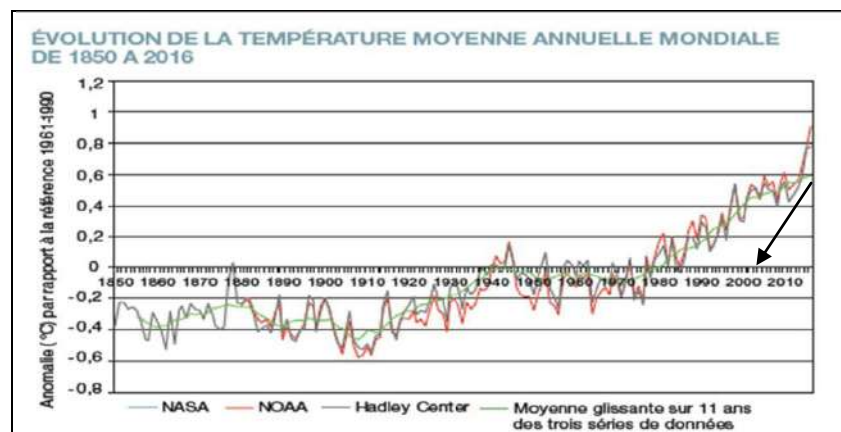


Figure 35 : variation des températures du globe depuis 400 000 ans (Rouabhi, 2019)



+ 1,1 °C en 2016 par rapport à la période Préindustrielle

Figure 36 : Evaluation de la température moyenne annuelle mondiale de 1850-2016 (GIEC, 2014)

V.1.4. PRESSION :

Par définition, la pression en un point est donnée par le poids de la colonne d'air qui le surmonte. Lorsqu'on s'élève, la hauteur de cette colonne diminue, tout comme son poids, et la pression diminue en conséquence.

La pression atmosphérique se mesure à l'aide d'un baromètre, d'un hypsomètre ou d'un altimètre. Elle a été longtemps mesurée en millimètres de mercure (symbole mmHg nommé aussi torr, symbole Torr) en raison de l'utilisation courante du baromètre à colonne de mercure.

Depuis l'adoption du pascal dans le Système international d'unités (SI) comme unité de la pression, les météorologues utilisent un multiple de cette unité, l'hectopascal (hPa), qui a l'avantage de correspondre exactement au millibar utilisé auparavant : 1 hPa = 1 mbar. (Gastronomiac, 2021).

V.2. Facteurs hydrologiques :

V.2.1. Précipitations :

Ce sont l'ensemble des eaux météorologiques qui tombent sur la surface de la terre tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre..). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression, (fig41).

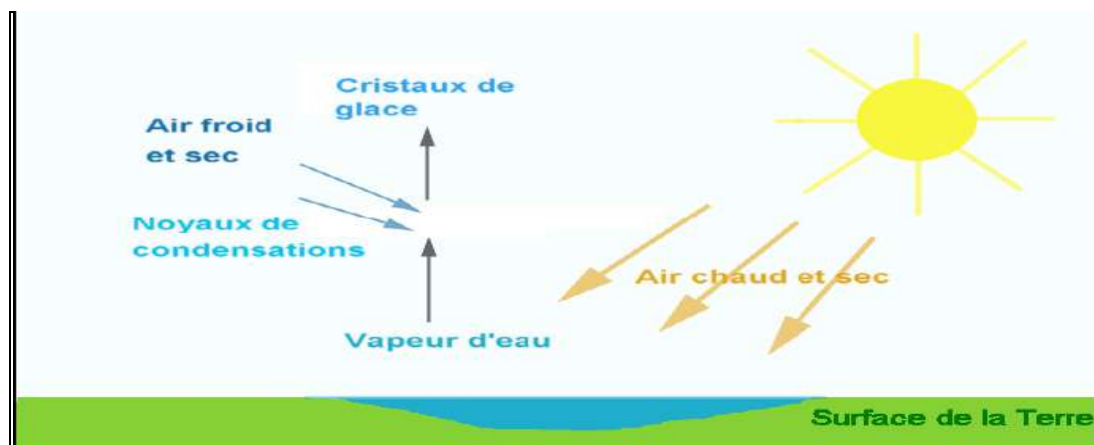


Figure37 : schéma simple de formation des précipitations (SAFA, 2012)

Les précipitations peuvent être classées en trois principaux types :

- **Les précipitations convectives :** elles résultent d'une ascension rapide des masses d'air dans l'atmosphère ; Les précipitations résultantes de ce processus sont en général orageuses, de courte durée (moins d'une heure), de forte intensité et de faible extension spatiale
- **Les précipitations orographiques :** les caractéristiques des précipitations orographiques dépendent de l'altitude, de la pente et de son orientation, mais aussi de la distance séparant l'origine de la masse d'air chaud du lieu de soulèvement. En général, elles présentent une intensité et une fréquence assez régulières.
- **Les précipitations frontales ou de type cyclonique :** elles sont associées aux surfaces de contact entre deux masses d'air de température, de gradient thermique vertical, d'humidité et de vitesse de déplacement différents, que l'on nomme « fronts ».

A l'échelle mondiale, on peut classer les précipitations en plusieurs régimes pluviométriques. Ces régimes sont définis à partir des précipitations moyennes annuelles ou moyennes mensuelles. (SAFA.2018).



Figure38 : formation de la pluie

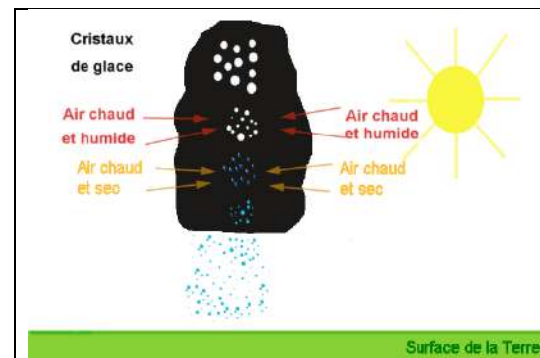


figure39 : formation des bruines

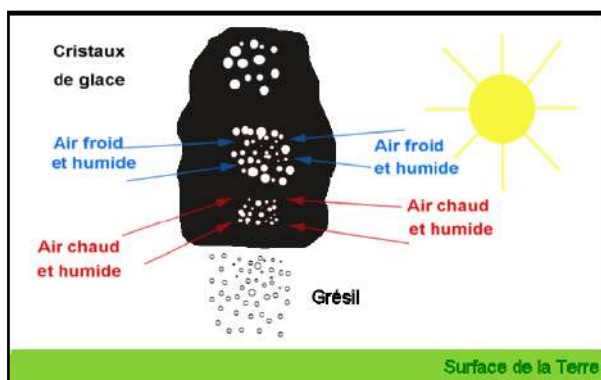


Figure40 : formation de grésil

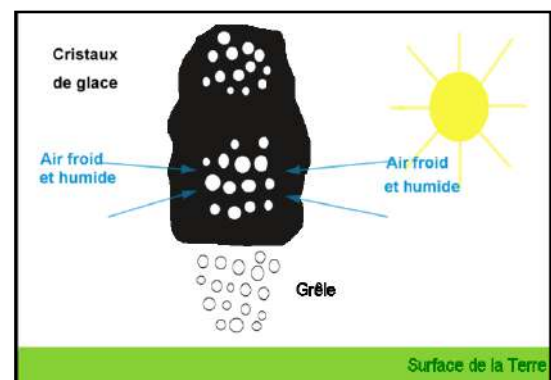


figure41 : formation de grêle

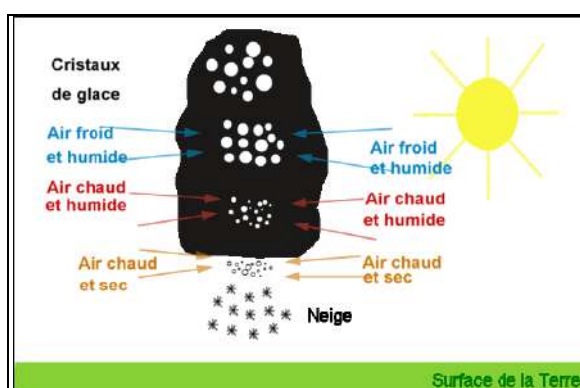


Figure42 : formation de neige

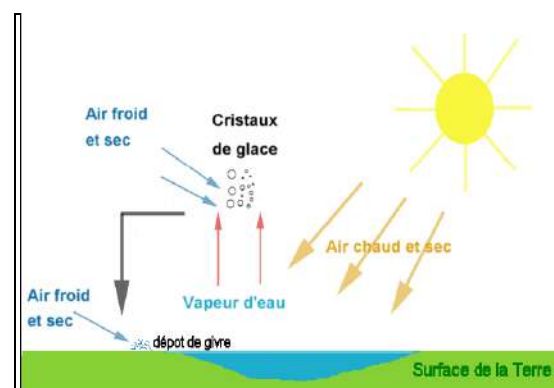


figure43 : formation de la givre ou rosée

(A.SAFA, UO2-MB, 2011 /2012).

➤ La répartition des précipitations sur l'année :

Tous les régimes de pluies de chaque lieu du globe, par an, sont uniques. Il est toutefois possible de les classer en trois grands groupes principaux:

- Le régime régulier (pluies toute l'année)
- Le régime cyclique (Alternance d'une saison sèche et d'une saison des pluies)
- Le régime intermédiaire (Entre les deux, entre le régime cyclique et le régime régulier).

Dans ce type de classification, la quantité totale de précipitations annuelles n'est pas prise en compte.

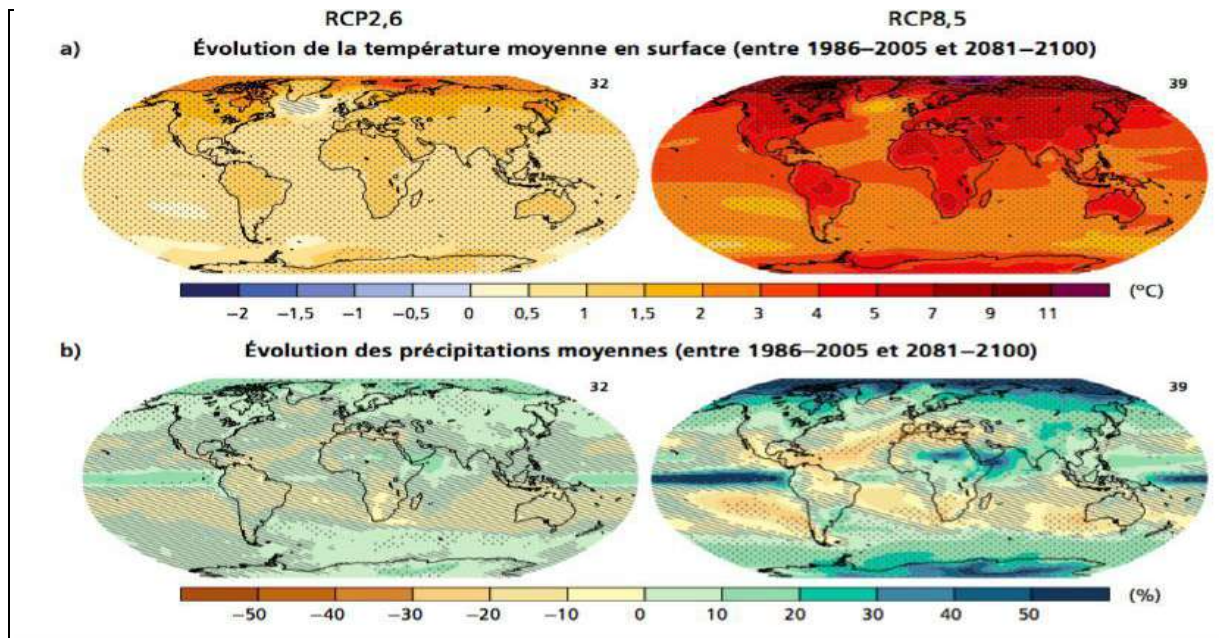


Figure 44 – Répartition mondiale de l'augmentation de température (a) et des variations de précipitation (b) pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5 (GIEC, 2014).

V.2.2. Hygrométrie : (L'humidité)

La Terre possède les conditions de température de surface permettant le maintien de l'eau sous ses trois formes solide, liquide et gazeuse. L'eau se répartit dans différents réservoirs à la surface de la planète. Le plus important est constitué par les océans qui représentent 97,1 % du volume total.

La faible proportion restante se retrouve par ordre de volumes décroissants dans :

- Les glaces : calottes polaires et glaciers
- Les eaux souterraines (superficielles)
- Les eaux de surface, rivières et lacs
- L'atmosphère
- Les êtres vivants.
- L'eau circule en permanence d'un réservoir à l'autre.

Pompage et transports sous différentes formes sont assurés par l'énergie solaire. Cela constitue le cycle de l'eau (fig 45). (Safa, 2013).

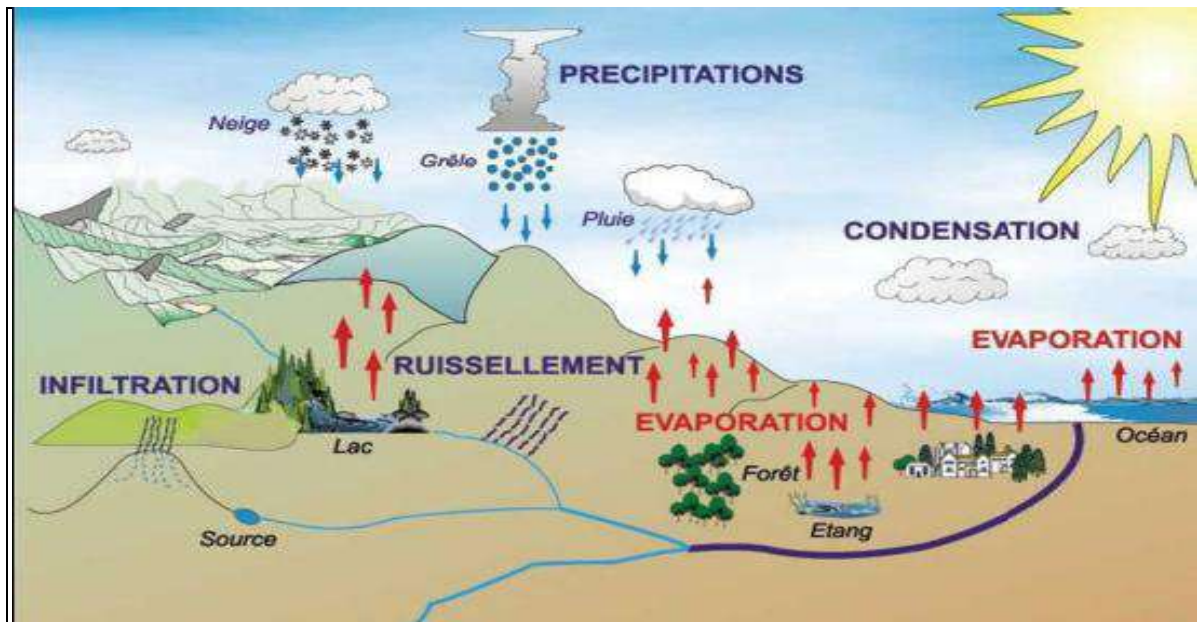


Figure45 : circulation de l'eau. (Safa, 2013).

V.3. Facteurs mécaniques :

V.3.1. Mouvement d'air : (Le vent)

Le vent, c'est le mouvement de l'air. Dans la langue courante et dans le langage des météorologistes, on appelle «vent» le seul mouvement horizontal de l'air. Les mouvements verticaux de l'air existent aussi : les météorologistes parlent de vitesse verticale.

Même si les conséquences des mouvements verticaux sont très importantes, pour faire des nuages et de la pluie par exemple, voire dramatiques, comme dans certains accidents d'avion au décollage ou à l'atterrissage, ces mouvements sont moins faciles à aborder et laissent moins de marques dans le langage courant. (Clément, 2017).

On peut également utiliser les directions données sur une rose des vents ; dans les abréviations, on utilise souvent W pour Ouest, parce que O prête à beaucoup de confusions : en allemand par exemple, "Ost" veut dire Est.



Figure46 : anémomètre. (Amazon, 2019).

La vitesse du vent peut être estimée assez précisément avec la manche à air. Elle est mesurée à l'aide d'un anémomètre (**fig46**). L'unité standard internationale est le mètre par seconde (m.s-1), mais on parle souvent en kilomètres par heure (km.h-1) ou kilomètres à l'heure ; les marins utilisent le plus souvent le nœud, abréviation nd en français ou kt (knot) en anglais. Un ms-1 vaut 3,6 km/h-1 et environ 2 nœuds : une vitesse de 1 nœud, c'est une vitesse de 1 mille nautique à l'heure et le mille nautique vaut 1852 mètres.

VI. Eléments du système climatiques :

VI.1. L'atmosphère :

L'atmosphère est l'élément le plus réactif du système du fait du fort potentiel dynamique associé au mouvement de l'air. C'est ici qu'ont lieu les échanges radiatifs de même que les changements rapides associés aux variations quotidiennes du temps. (**Martin, 2009**).

La masse totale de l'atmosphère est estimée à $5,29 \times 10^{18}$ kg, masse négligeable comparée à celle des mers ($1,35 \times 10^{21}$ kg) ou de l'ensemble du globe ($5,98 \times 10^{24}$ kg). Les gaz et la vapeur d'eau en sont les constituants transparents. Les particules d'eau et de glace donnent les nuages, le brouillard et les précipitations. Les fines particules solides sous forme d'aérosols forment les brumes et le smog. C'est cette couche gazeuse qui rend la Terre habitable. (**Jacques, 2005**).

D'autres composés tels que le néon, l'hélium ou le méthane sont également présents dans l'atmosphère en concentration très faible.

Si nous nous basons sur la température, nous observons au moins 05 couches différentes :

-La troposphère : entre 0 et 6-18km d'altitude en fonction de la latitude où la température décroît avec l'altitude

-La stratosphère : entre 6-18 et 50km d'altitude où la température augmente avec l'altitude

-La mésosphère : entre 50 et 85km d'altitude où la température décroît avec l'altitude

-La thermosphère : entre 85 et environ 800km d'altitude où la température augmente avec l'altitude

-L'exosphère : à partir de 800km d'altitude où l'atmosphère s'évade dans l'espace.

Tableau 02 : compositions de l’atmosphère (exprimée en ppm (parties pour un million, c’est-à-dire millièmes) par rapport à l’air sec. (Alain, 2009).

Gaz atmosphériques	En volume	En masse
Azote (N ₂)	780 836	755 192
Oxygène (O ₂)	209 475	231 418
Argon (Ar)	9 340	12 882
Dioxyde de carbone (CO ₂)	322	489
Néon (Ne)	18,18	12,67
Krypton (Kr)	1,14	3,30
Méthane (CH ₄)	1,5	0,83
Hélium (He)	5,24	0,724
Dioxyde d’azote (NO ₂)	0,27	0,410
Ozone (O ₃)	0,04	0,065
Xénon (Xe)	0,087	0,395
Hydrogène (H ₂)	0,5	0,035
Monoxyde de carbone (CO)	0,19	0,19

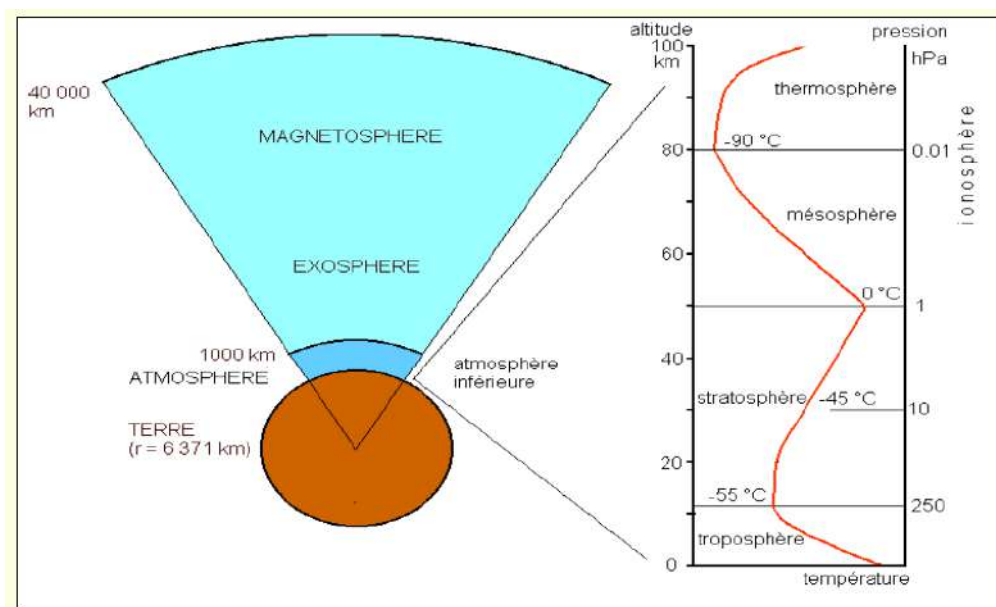


Figure47 : les principales enveloppes du globe terrestre (Alain, 2009).

VI.2. Les océans :

Les océans constituent l’environnement prédominant de notre planète. En effet, si la Terre est appelée la planète bleue c’est que près de 71% de sa surface sont couverts par les océans dont les principaux sont l’océan Atlantique, l’océan Pacifique et l’océan Indien. Les interactions entre les océans et les autres éléments du système climatique de même que la dynamique interne de ceux-ci sont donc d’une grande importance pour les caractéristiques tant régionales que globales du climat.

Les océans remplissent un rôle important pour le système climatique en tant que réservoir et transporteur d'énergie et de matière. Comme discuté précédemment, les océans transportent l'excédent d'énergie thermique reçue au niveau des tropiques vers les hautes latitudes par le biais des courants de surface et de la circulation thermohaline. (UCL, 2017)

VI.3. La biosphère :

La biosphère fait référence à tous les êtres vivants qui vivent à la surface de notre planète. Ce concept englobe les végétaux terrestres et marins tout comme les mammifères, les reptiles, les poissons, etc., mais aussi des organismes beaucoup plus petits tels que les bactéries ou le plancton marin. Chacun de ces organismes interagit avec les autres par la prédation, le parasitisme, la symbiose, etc.

On peut aussi considérer la biosphère et plus particulièrement les grandes forêts comme des puits pour le carbone atmosphérique. En effet, par le mécanisme de la photosynthèse, les végétaux synthétisent le carbone organique, nécessaire à leur constitution, à partir de lumière et de dioxyde de carbone (CO_2 atmosphérique). (Martin, 2012).

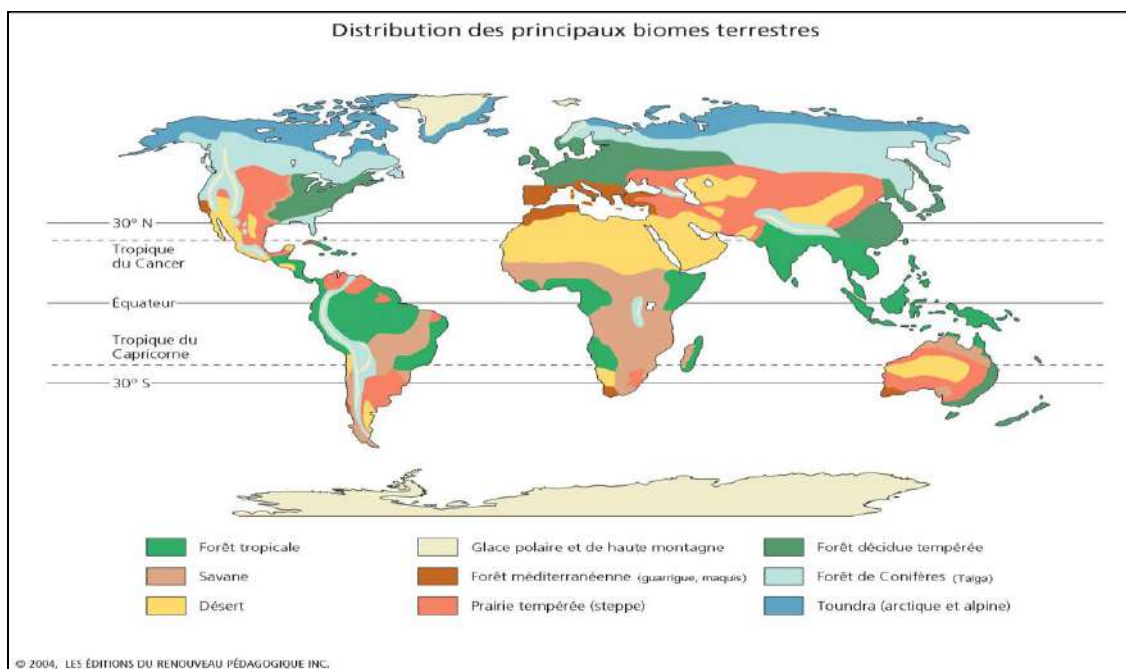


Figure 48: distribution des principaux biomes terrestres (Édition du renouveau pédagogique, 2004).

VI.4. La lithosphère :

La planète Terre est composée de différentes enveloppes qui présentent des caractéristiques propres (chimiques, minéralogiques et physiques). Le noyau interne (ou graine) est solide, dense, chaud ($6000\pm\text{C}$) et composé essentiellement de métaux (fer et nickel). Le noyau externe, très peu visqueux, est considéré comme « liquide », à $4000\pm\text{C}$. Ce

noyau externe, riche en fer et en mouvement, participe à la création d'un champ magnétique terrestre.

Le manteau, divisé en manteau inférieur et supérieur, est composé de différents minéraux comme les cristaux d'olivine ou de pyroxène. Au sein de ce manteau, la convection, qui est un mode de transfert de chaleur, a pour effet la mise en mouvement de la matière du manteau. Ces mouvements se répercutent sur la croûte terrestre. Cette dernière est la partie superficielle, solide, de la planète Terre ; Cette croûte est divisée en différentes plaques tectoniques qui se déplacent les unes par rapport aux autres à cause des mouvements se produisant dans le manteau. (UCL, 2017).

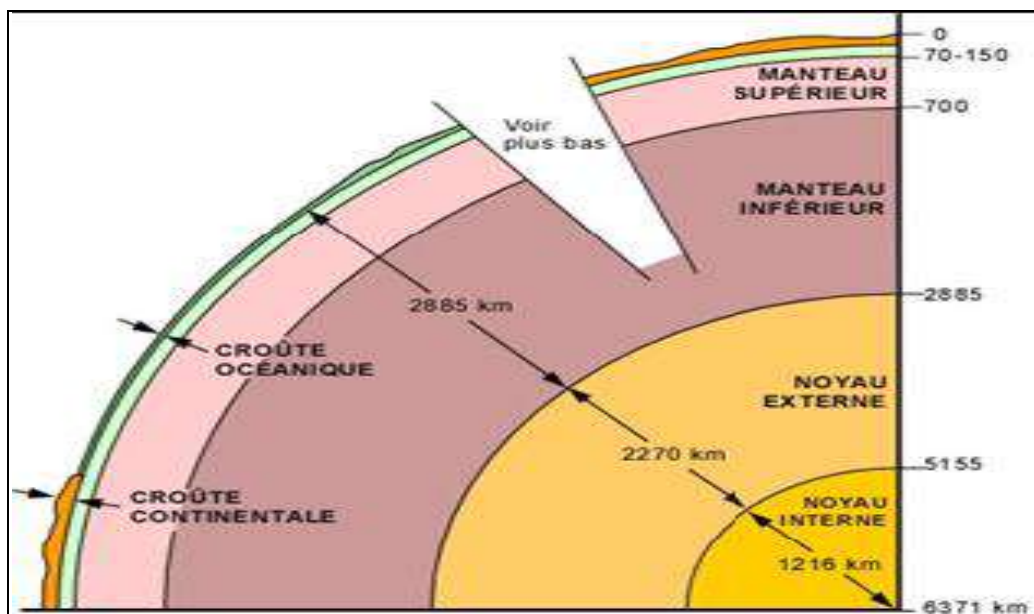


Figure 49: La structure interne de la Terre (future-science, 2019).

VI.5. La cryosphère :

La cryosphère est le nom donné à l'ensemble des surfaces où est présente de la glace. Elle inclut ainsi les glaciers, les inlandsis (nappes glaciaires suffisamment épaisses pour recouvrir le relief sous jacent), la neige, le pergélisol (sol dont la température est inférieure à $0 \pm C$ durant plusieurs années) et la banquise.

A la cryosphère sont associées de très nombreuses interactions avec les autres composantes du système climatique de même que des rétroactions particulièrement efficaces qui ont une grande influence sur l'évolution du climat. Par exemple, la neige et la glace, du fait de leur couleur claire, réfléchissent une grande partie du rayonnement solaire incident. Ainsi, la présence de glace et de neige sur le sol ou la mer modifie radicalement la part du rayonnement solaire absorbé localement. Cette modification engendre un refroidissement qui

conduit alors à la présence d'une plus grande quantité de neige et de glace. C'est ce que l'on nomme la rétroaction albédo-température. (Rouabhi, 2019).

VII. Classification du climat :

Les indices climatiques globaux fournissent des variables synthétiques qui combinent généralement des données climatiques moyennes calculées à partir de séries climatologiques correspondant à un poste d'observation. Ces indices ont été tout 'abord utilisés pour classer et cartographier les climats selon leur aridité par les hydrologues et les géomorphologues puis par les botanistes et écologues.

VII.1. Classifications empiriques :

De nombreuses classifications empiriques ont été proposées dont nous n'examinerons que deux, celle de Martonne et celle de Köppen.

➤ Classification des climats selon De Martonne

La classification d'Emmanuel de Martonne est fondée sur un indice d'aridité qu'il a défini en 1926. Cet indice se calcule par la formule : $I = \frac{P}{T+10}$

Où P est le total annuel des précipitations en mm et T la température moyenne annuelle en °C. Élaboré principalement pour qualifier les zones arides, il n'est pas utilisable dans les régions froides : en effet, il n'est pas défini pour $T = -10$ °C et il est négatif pour $T < -10$ °C (Fig57). (Alain, 2009).

➤ Classification des climats selon Köppen :

La classification de Köppen-Geiger (1923) (Tab.3), est encore largement utilisée. Köppen, botaniste de formation, donnait beaucoup d'importance aux relations entre le climat et la végétation, ce qui transparaît dans sa classification.

Celle-ci utilise 3 critères d'importance décroissante et désignés, pour chaque catégorie, par 3 lettres successives. La première lettre, de A à E, correspond à la caractéristique principale de la catégorie climatique et donc aux grands types de climat. La deuxième lettre correspond essentiellement au régime pluviométrique, parfois à la température. Cette lettre, tantôt une majuscule, tantôt une minuscule, est l'initiale d'un mot allemand : F : Frost (gel), S: Steppe, T: Tundra, W: Wüste (déserts). La troisième lettre se réfère uniquement à la température moyenne : a, b, c, d, h (trocken-heiss : chaud et sec) et k (trockenkalt : froid et sec). (Rouabhi, 2019).

Tableau 03 : Grands types de climats de Köppen-Geiger (**M. Kotték, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf et F. Rubel, 2006**).

Types de climat	Sous-type de climat	Caractéristiques
A : climat équatoriaux ($T_{\min} \geq +18\text{ °C}$)	Af : forêt humide équatoriale	$P_{\min} \geq 60\text{mm}$
	Am : mousson équatoriale	$P_{\text{ann}} \geq 25 (100P_{\min})$
	As : savane équatoriale à été sec	$P_{\min} < 60\text{ mm}$ en été
	Aw : savane équatoriale à été humide	$P_{\min} > 60\text{mm}$ en été
B : climats arides $P_{\text{ann}} < 10\text{ pth}$	BS : climat de steppe	$P_{\text{ann}} > 5\text{pth}$
	BW : climat de désert	$P_{\text{ann}} < 5\text{pth}$
C : climats tempérés $-3\text{ °C} < T_{\min} < +18\text{ °C}$	Cs : climats tempérés à été sec	$P_{\min} < P_{w\min}, P_{w\max} > 3 P_{\min}$ et $P_{\min} < 40\text{ mm}$
	Cw : climats tempérés à hiver sec	$P_{w\min} < P_{\min}$ et $P_{\max} > 10 P_{w\min}$
	Cf : climats tempérés toujours humides (ni Cs ni Cw)	
D : climats neigeux $T_{\min} \leq -3\text{ °C}$	Ds : climats neigeux à été sec	$P_{\min} < P_{w\min}, P_{w\max} > 3P_{\min}$ et $P_{\min} < 40\text{mm}$
	Dw : climats neigeux à hiver sec	$P_{w\min} < P_{\min}$ et $P_{\max} > 10 P_{w\min}$
	Df : climats neigeux toujours humide (ni Ds ni Dw)	
E : climats polaires $T_{\max} < +10\text{ °C}$	ET : climat de toundra	$0\text{ °C} \leq T_{\max} < +10\text{ °C}$
	EF : climat des glaces	

VII.2. Classifications génétiques :

Les classifications génétiques sont fondées sur les mécanismes qui engendrent les climats. Le principal est bien entendu la circulation générale atmosphérique. Il serait suffisant si la surface terrestre était uniforme : on pourrait en effet se contenter de définir des zones de climat parallèles à l'équateur. Mais ce n'est pas le cas puisqu'il existe des surfaces océaniques et des surfaces terrestres dont la répartition est capricieuse, ces dernières montrant, de plus, un

relief inégalement réparti. On doit donc, à une zonalité climatique, ajouter des composantes azonales dont les définitions sont, en partie, arbitraires. (Alain, 2009).

VIII. Fonctionnement du Système climatique :

Le système climatique est très simple à définir : c'est l'ensemble de la planète. On y identifie aisément les sous-ensembles : l'atmosphère, l'océan, la cryosphère (la glace), la biosphère continentale et marine, la géosphère et l'homme. Entre ces éléments, il existe des relations plus ou moins fortes, des couplages. Ces relations sont réciproques ou non ; par exemple si la géosphère agit fortement sur l'atmosphère par l'intermédiaire des volcans, la réciproque n'est pas vraie : on imagine mal l'influence de l'atmosphère sur le volcanisme. Lorsque la relation est réciproque, on pourra parler d'interaction. ; Entre l'atmosphère et l'océan, les interactions sont fortes, ces deux masses d'eau et d'air règnent toutes deux sur l'ensemble du système climatique mondial et les climats sont générés par un échange important d'énergie entre ceux-ci.

Ainsi l'énergie directement reçue du Soleil, sous forme d'ondes courtes, est captée par les mers et les continents selon l'albédo de leur surface et la végétation qui couvre les continents. Ainsi la banquise renvoie par réflexion vers l'espace une grande quantité d'énergie alors que la mer l'absorbe de façon importante. L'essentiel de l'énergie thermique reçue est captée dans les zones intertropicales. C'est là que l'intensité des rayons solaires est la plus importante et la plus régulière. (Yves, 2003).

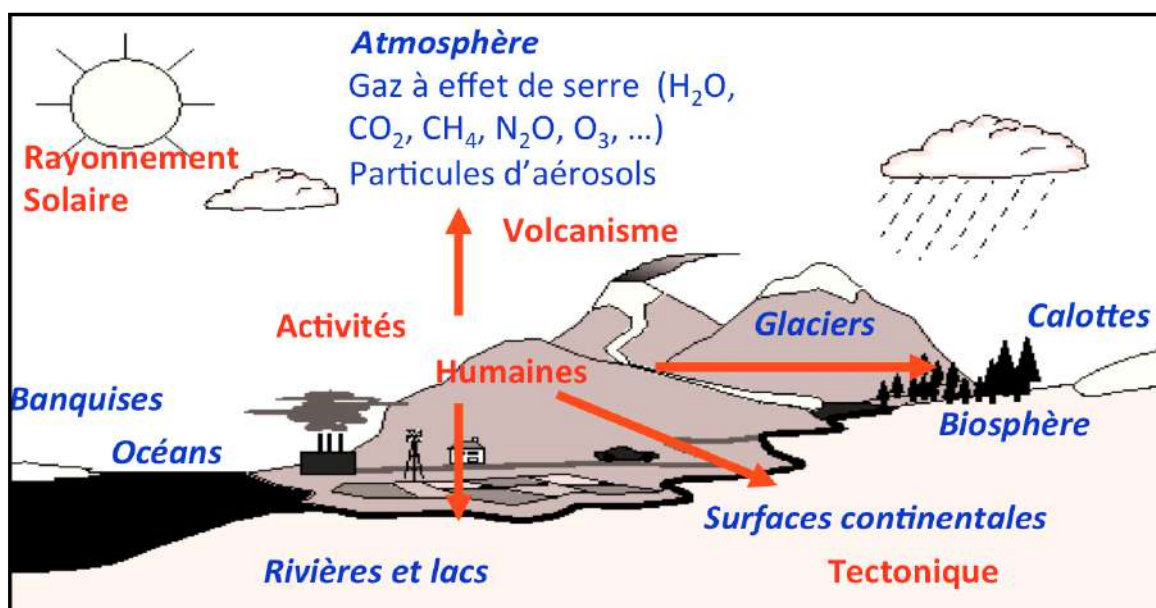


Figure50 : fonctionnement du système climatique. (Yves, 2003)

IX. Question de changement climatique :

Le changement climatique est une variation de l'état du climat que l'on peut déceler par les modifications de la moyenne et/ou les variations de ses propriétés et qui persiste pendant de longues périodes, généralement pendant des décennies ou plus (**GIEC, 2007**).

Les changements climatiques sont causés par les modifications de l'atmosphère qui résultent de sa transformation chimique par les gaz à effet de serre (GES). Cette perturbation de l'équilibre atmosphérique s'exprime par une augmentation des températures moyennes sur Terre, modifiant ses caractéristiques physiques, chimiques et biologiques. (**Jeanne et Christine, 2011**).

La réalité de changements de climat parfois considérables n'est pas contestable. Il est donc convenable d'en chercher les causes. Beaucoup ont été proposées et il n'est pas toujours aisé, dans l'état actuel des connaissances, d'évaluer les poids de leurs contributions respectives. D'ailleurs, il apparaît que ces multiples causes s'exercent généralement sur des durées très diverses et peuvent donc jouer ensemble, mais à des échelles de temps variées. (**Alain, 2009**).

X. Causes du changement climatique :

Le climat de la Terre dépend de nombreux facteurs, tels que la teneur en gaz à effet de serre et en aérosols de l'atmosphère, la quantité d'énergie provenant du soleil, ou encore les propriétés de la surface de la Terre. Quand les activités humaines ou naturelles modifient ces facteurs, ceux-ci provoquent un réchauffement ou un refroidissement de la planète, car ils modifient la quantité d'énergie solaire qui sera absorbée ou réfléchi dans l'espace. (**Dominique et Carla, 2002**).

La concentration des gaz à effet de serre (GES) que sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O) a fortement augmenté dans l'atmosphère en raison des émissions engendrées par l'activité humaine depuis l'époque préindustrielle (figure RID.1c). Le cumul des émissions atmosphériques anthropiques de CO₂ entre 1750 et 2011 s'élève à 2040 ± 310 GtCO₂. Pour environ 40 %, ces émissions sont restées dans l'atmosphère (880 ± 35 GtCO₂), le reste ayant été éliminé de l'atmosphère et se trouvant stocké dans la végétation et le sol ainsi que dans l'océan. (**GIEC, 2014**).

Le dioxyde de carbone est le plus important gaz à effet de serre d'origine anthropique. Sa concentration atmosphérique (379 ppm en 2005) est à l'heure actuelle bien plus élevée qu'elle ne l'a jamais été au cours des 650 000 dernières années, où elle oscillait naturellement

entre 180 et 300 ppm. Aujourd'hui, elle augmente plus rapidement qu'elle ne l'a jamais fait depuis l'introduction des mesures systématiques en 1960, en raison principalement de l'utilisation de combustibles fossiles et, dans une moindre mesure, des changements d'affectation des terres. Par exemple, les émissions de dioxyde de carbone provenant de l'utilisation de combustibles fossiles sont passées de 6,4 Gt par an dans les années 90 à 7,2 Gt de carbone par an pour la période 2000-2005.

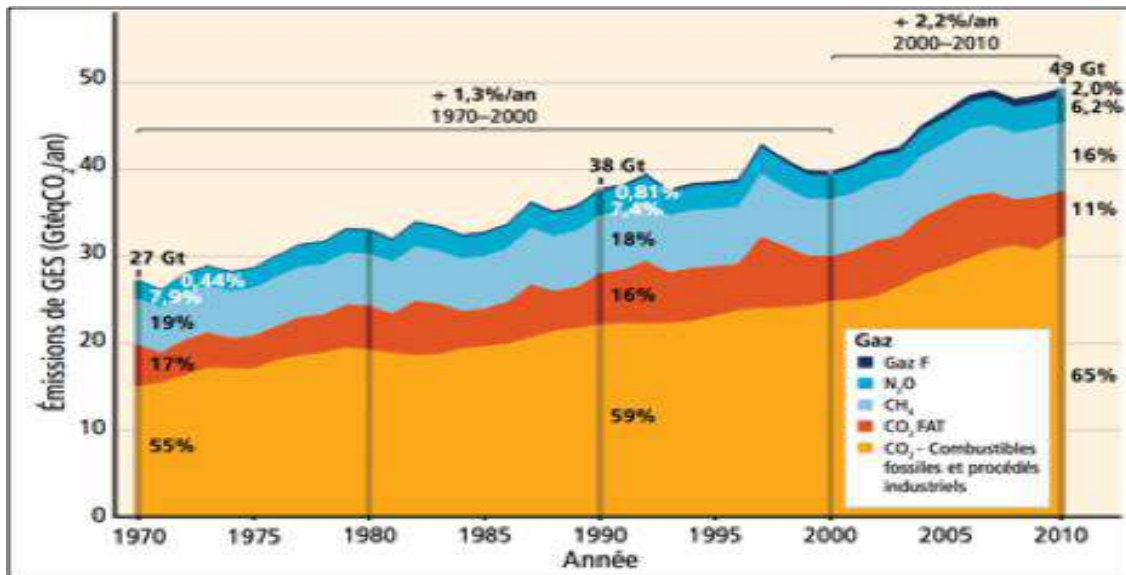


Figure 51 : Total annuel des émissions anthropiques de GES par groupes de gaz entre 1970 et 2010 (GIEC, 2014).

Globalement, les croissances économique et démographique continuent d'être les moteurs les plus importants de l'augmentation des émissions de CO₂ dues à l'utilisation des combustibles fossiles. Entre 2000 et 2010, la contribution de la croissance démographique est restée à peu près identique à celle des trois décennies précédentes, tandis que la contribution de la croissance économique est montée en flèche. L'augmentation de l'utilisation du charbon a inversé une tendance ancienne de décarbonisation progressive de l'approvisionnement mondial en énergie (c'est-à-dire à une réduction de l'intensité carbone dans le secteur de l'énergie). (GIEC, 2014).

Et puis les activités humaines, elles agissent aussi sur les surfaces continentales en modifiant par exemple le contenu du sol par l'irrigation ou encore l'aménagement des rivières et des lacs qui va avoir une influence mais là, cette fois, locale, régionale sur le climat. (Serge, 2020).

XI. Modification du climat par l'homme :

L'homme continue de nos jours à exercer son influence sur le climat par l'utilisation de l'eau fluviale pour l'irrigation, l'aménagement de grands lacs artificiels, ainsi que par défrichage et l'urbanisation à l'échelle du globe. Ce sont surtout les grandes villes qui ont un impact important sur le climat de leur environnement immédiat. (Pier, 2011).

Les principales causes humaines de l'augmentation de l'effet de serre ont trait à la production d'énergie, aux procédés industriels, aux transports et aux activités agricoles.

➤ **Production d'énergie :**

L'énergie est utilisée dans la production d'électricité, le chauffage, l'industrie et les transports; le secteur de la production d'énergie représenterait 43 % des émissions de CO₂ dans le monde.

➤ **L'industrie :**

L'industrie émet une quantité importante de gaz à effet de serre (19 % du total mondial).

➤ **Les transports :**

Au plan mondial, les transports représentent 20 à 22 % de la contribution humaine à l'effet de serre global et c'est également le secteur où la croissance est la plus forte, particulièrement pour le fret routier et l'aviation. (Dominique et Carla, 2002).

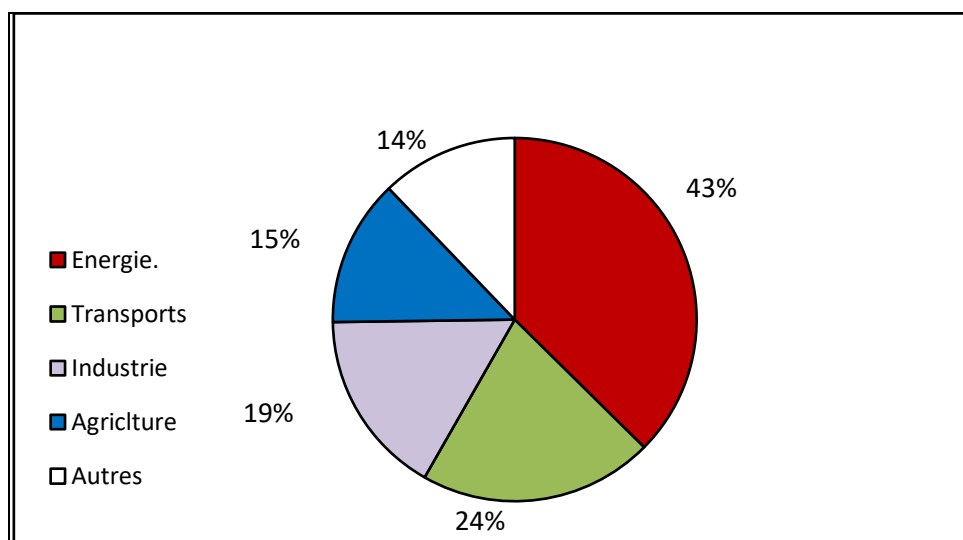


Figure 52 : Les sources de CO₂ liées à l'activité humaine en 1998
(Agence Internationale de l'énergie, 1999)

XII. Les conséquences du changement climatiques :**XII.1. Effet du changement sur la couche d'ozone :**

L'effet de serre favorise la destruction de la couche d'ozone. En effet, les gaz à effet de serre refroidissent les couches supérieures de l'atmosphère (la stratosphère) ce qui encourage l'action destructrice de l'ozone des molécules de chlore des CFC. Ainsi, les populations qui vivent aujourd'hui en Arctique recevront une dose d'UV 30% supérieure. **(Rouabhi, 2019).**

XII.2. Effet du changement sur la faune :

La faune terrestre est sensible aux changements de températures. On observe ainsi au cours du XXe siècle un déplacement sensible vers le nord des aires de répartition d'une majorité de papillons britanniques. Il est probable que cela soit en réaction à des températures plus élevées.

Les zones d'implantation de certaines espèces tendent à s'étendre, avec un risque de fragilisation des écosystèmes déjà particulièrement touchés ; C'est le cas par exemple des espèces thermophiles. Dans des zones à l'origine plus tempérées, on a ainsi pu observer l'implantation croissante d'espèces tropicales. Parmi elles, certaines peuvent être dangereuses pour les êtres humains ou les cultures, avec par exemple la prolifération de certains insectes ravageurs comme les mouches blanches. **(ADEME, 2019)**

XII.3. Effet du changement sur la flore :

L'augmentation des niveaux de CO₂ dans l'atmosphère pourrait être, à court terme, bénéfique sur la végétation. En effet, depuis une trentaine d'années, les terres végétalisées, situées principalement aux tropiques et à des latitudes élevées, ont gagné de 25 % à 50 % de couverture foliaire tandis qu'à l'inverse, seulement 4 % des sols ont vu décliner leur végétation, notamment en Mongolie, en Argentine et en Alaska.

Selon les simulations des scientifiques, ce phénomène est dû pour 70% à l'effet fertilisant du CO₂ atmosphérique, pour 9% à l'augmentation de l'azote dans l'environnement et pour 8% au réchauffement climatique. Malheureusement, l'effet fertilisant s'affaiblit et deviendrait inefficace avec des teneurs en CO₂ plus élevées. De plus, cette densification de la végétation ne doit pas cacher la réalité de la déforestation massive et son impact défavorable sur le climat. **(Rouabhi, 2019).**

XII.4. Au niveau de mer :

Les mesures des océanographes montrent que le niveau des océans s'est élevé de 18 cm en moyenne dans le monde entre 1870 et 2000. Le phénomène s'accélère, avec une hausse de 6 cm ces 20 dernières années.

Le GIEC estime que le niveau moyen des mers et des océans pourrait s'élever jusqu'à 82 cm d'ici la fin du siècle si rien n'est fait pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. Au niveau mondial, une hausse de 1 mètre du niveau des mers toucherait directement 1/10 de la population mondiale, soit 600 à 700 millions de personnes. (ADEME, 2019).

XII.5. L'acidification des océans :

L'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère influence plus directement les océans (Sabine et al. 2004). En effet, l'océan a absorbé près de la moitié des émissions de CO₂ depuis 1800 (118 milliards de tonnes de carbone). Cette absorption massive a permis d'atténuer les effets du changement climatique mais a provoqué un bouleversement de la chimie de l'eau, entraînant une réduction de 0,1 unité de pH. Cette diminution, qui peut paraître faible, correspond à un triplement de la concentration en ions hydrogène. Cette situation est une première au cours de ces derniers 20 millions d'années (Orr et al. 2005, Gattuso 2007).

Si les émissions de CO₂ continuent au rythme actuel, l'acidification pourrait correspondre à une réduction de pH de 0,4 unité d'ici à 2100 (Caldeira et wicktt, 2003).

L'avenir de nombreux organismes marins clés est sérieusement menacé par ce phénomène d'acidification croissante des océans. (Blackford 2010).

XII.6. Effet du changement sur la santé :

Le changement climatique aura des effets sur la plupart des populations au cours des prochaines décennies, avec un risque accru pour la vie et le bien-être de plusieurs milliards de personnes. (Costello et al, 2009). .

Le changement climatique peut affecter la santé par toute une série de mécanismes, notamment par les effets relativement directs des phénomènes comme les vagues de chaleur, les inondations et les tempêtes, mais également de manière plus complexe par la modification de l'épidémiologie des maladies infectieuses, le dérèglement de l'écosystème agricole et d'autres écosystèmes de soutien, voire par des déplacements de populations ou des conflits dus à la raréfaction des ressources comme l'eau, les terres fertiles et les pêcheries (Pachauri et Reisinger, 2007).

Chapitre IV
Microorganismes
et
changement climatique

I. Les effets des microorganismes marins sur le changement climatique dans les biomes marins :**I. 1. Le phytoplancton marin :**

Atténue le réchauffement mondial en fixant la moitié du CO₂ photosynthétique global. Sa production primaire mondiale nette est d'environ 50 pétagrammes (1 Pg = 10⁹ tonnes) de carbone par an et il produit la moitié de l'oxygène total, malgré une biomasse égale à seulement ~ 1 % de la biomasse végétale mondiale.

En comparaison avec les plantes terrestres, le phytoplancton marin est distribué sur une plus grande surface. Il est exposé à moins de variations saisonnières et à un taux de renouvellement nettement plus rapide que les arbres (il se compte en jours plutôt qu'en décennies).**(Frank,2019)**.

Par ailleurs, le phytoplancton réagit rapidement à l'échelle mondiale aux variations climatiques et des phénomènes de bloom cycliques se produisent. Ils dépendent plusieurs facteurs :

- la disponibilité des nutriments essentiels dans la colonne d'eau ;
- la présence d'herbivores (qui consomment le phytoplancton) et de pathogènes ;
- le rayonnement solaire ;
- la température ;
- les apports d'eau douce ;
- le taux de CO₂.

Ces caractéristiques doivent être prises en compte pour évaluer les contributions du phytoplancton à la fixation du carbone et à la prévision de la façon dont cette production peut changer en réponse à des perturbations. Par exemple, l'augmentation du rayonnement solaire, de la température et des apports d'eau douce aux eaux de surface renforcent la stratification des océans et, par conséquent, réduisent le transport des éléments nutritifs de l'eau profonde vers les eaux de surface, et donc la productivité primaire du phytoplancton.

Inversement, l'augmentation des niveaux de CO₂ stimulent la production primaire de phytoplancton, lorsque les nutriments ne sont pas limitatifs.

Au sein du phytoplancton, les diatomées assurent 25-45% de la production primaire totale des océans, en raison de leur prévalence dans les régions de haute mer lorsque la biomasse totale de phytoplancton est maximale.

Les diatomées ont un taux de sédimentation particulièrement élevé par rapport aux autres groupes de phytoplancton et elles représentent environ 40 % du stockage de carbone particulaire dans les profondeurs. Les enrichissements saisonniers en nutriments dans les eaux de surface favorisent la multiplication des diatomées.

Le changement climatique d'origine anthropique affectera directement ces cycles saisonniers en modifiant la temporalité des blooms, ce qui diminuera probablement la biomasse des diatomées, donc la production primaire et les captages de CO₂ associés. (Mark, 2015).

Les données de télédétection suggèrent un déclin global de la biomasse des diatomées entre 1998 et 2012, en particulier dans le Pacifique Nord, qui est associé à la faible profondeur des couches mixtes de surface dans lesquelles elles vivent et aux concentrations plus faibles en éléments nutritifs. (Cecile et al, 2015).

Le phytoplancton émet du diméthylsulfure et son dérivé, le sulfate de diméthylsulfure, qui favorise les condensations des nuages. Ces molécules sont relâchées dans l'atmosphère sous forme d'aérosols marins se composant d'un mélange complexe de sel marin, de sulfate non salin et de molécules organiques. Ils peuvent servir de noyaux de condensation des nuages, influençant les précipitations, le bilan radiatif et donc le climat.

Ces aérosols biogènes dans l'hémisphère sud ont un nombre et une taille de gouttelettes similaires à ceux des aérosols des régions très polluées ; La manière dont ces processus influencent le climat demeure incertaine. Comprendre comment et quel phytoplancton marin contribue aux aérosols permettrait de mieux prédire l'évolution des conditions océaniques et ses répercussions sur le climat.

L'atmosphère elle-même contient $\sim 10^{22}$ microorganismes : comprendre les conditions de croissance de ces microorganismes atmosphériques et leur capacité à former des agrégats seront précieux pour évaluer leur influence sur le climat. (Antje, 2019).

I.2. Les archées et les bactéries chimio-litho-autotrophes :

Fixent également le CO₂ dans les eaux océaniques profondes et à la surface pendant l'hiver polaire. Ces microorganismes contribuent aussi à la respiration de l'océan en produisant du CO₂ et aux cycles de nombreux éléments.

L'influence sur les flux atmosphériques de méthane des microorganismes des fonds marins méthanogènes (produisant du méthane) et méthanotrophes (utilisant du méthane) est plus incertaine.

I.3. Les virus marins, les bactéries et les herbivores eucaryotes :

Régulent la biomasse du phytoplancton par sa consommation ou sa contamination. Ils sont donc également des composants importants des réseaux trophiques marins et influencent l'efficacité de la séquestration du carbone dans les profondeurs de l'océan.

Le changement climatique affecte les interactions prédateurs-proies, y compris les interactions virus-hôte et donc des cycles biogéochimiques globaux. (Danovaro et al, 2016).

I.4. Les habitats côtiers végétalisés :

Sont importants pour la séquestration du carbone qui est dépendante de l'ensemble du spectre trophique allant des prédateurs aux herbivores, en passant par les plantes et leurs communautés bactériennes et fongiques associées.

L'activité humaine, y compris le changement climatique anthropique, a réduit ces habitats au cours des 50 dernières années de 25 à 50 % et l'abondance des prédateurs marins, par exemple a chuté de 90 %. Face à une telle perturbation, il est nécessaire d'en évaluer les effets sur les populations microbiennes car leur activité détermine la quantité de carbone reminéralisée et sous forme de CO₂ et de CH₄. (Atwood et al, 2015).

II. L'effet du changement climatique sur les microorganismes dans les biomes marins :

Le changement climatique perturbe les interactions entre les espèces et les force à s'adapter, se déplacer, être remplacées par d'autres espèces ou disparaître. Les conséquences majeures du changement climatique sont l'augmentation de la température des océans, leur acidification et leur eutrophisation.

Par ailleurs, l'Homme est également responsable d'une surexploitation des océans par la pêche ou le tourisme qui peut fragiliser les écosystèmes et aggraver les effets du changement climatique.

De nombreux facteurs environnementaux et physiologiques influencent les réponses et la compétitivité globale des microorganismes en conditions naturelles (température, niveaux de CO₂, acidification, etc.).

Ces phénomènes combinés se potentialisent, provoquant des boucles de rétroaction qui aggravent ou atténuent le changement climatique. Très peu d'études ont examiné l'adaptation évolutive des microorganismes aux diverses conséquences du changement climatique.

De même, la compréhension des mécanismes moléculaires de leurs réponses physiologiques et les implications de ces réponses pour les cycles biogéochimiques est encore parcellaire.

Ainsi, dans les biomes marins, plusieurs phénomènes ont une importance particulière :

- l'augmentation des températures en raison de l'effet des concentrations élevées de gaz à effet de serre ;
- la stratification et les mélanges d'eau ;
- la circulation thermohaline ;
- les variations d'apport en nutriments ;
- l'augmentation de l'irradiation.

Toute modification de l'activité microbienne a un impact sur l'ensemble de la chaîne trophique et donc sur le recyclage du carbone et les flux d'énergie, entraînant des changements majeurs dans la productivité, l'exportation et l'enfouissement du carbone dans les sédiments.

II.1. La productivité primaire du phytoplancton :

Est compliquée à évaluer en raison des phénomènes de bloom cycliques qui le caractérisent. Les études ne sont pas toujours d'accord entre elles. Certaines indiquent une diminution du phytoplancton océanique au cours du dernier siècle, d'autres suggèrent une augmentation globale de la biomasse mondiale de phytoplancton océanique avec des variations régionales, ou en fonction des groupes de phytoplancton.

Dans les zones polaires par exemple, un des mécanismes pourrait être la fonte des glaces qui conduit à une plus grande pénétration de la lumière et potentiellement une augmentation de la production primaire. (Cecile et al, 2019).

II.2. La sédimentation des matières organiques particulières :

Est un mécanisme clé à long terme pour la séquestration du CO₂ de l'atmosphère dans les fonds marins. Un équilibre déterminant pour le changement climatique s'installe entre la production du CO₂ et des nutriments par reminéralisation et l'enfouissement du CO₂ dans les sédiments profonds dont les 50 premiers centimètres contiennent $\sim 1 \times 10^{29}$ microorganismes.

En conséquence, le changement climatique devrait affecter particulièrement les processus fonctionnels dont les archées benthiques des grands fonds marins sont à l'origine (comme l'oxydation de l'ammoniac) et les cycles biogéochimiques associés. (Danovaro, al, 2016).

II.3. Influence de l'attitude et les courants océaniques sur la diversité des organismes marins :

En général, les microorganismes se dispersent plus facilement que les organismes macroscopiques. Néanmoins, des variations biogéographiques peuvent exister en fonction des espèces (mode de vie, associations) et des facteurs environnementaux qui influencent fortement les compositions des communautés, leurs fonctions et la répartition des microorganismes benthiques.

Si la migration vers des environnements plus favorables est impossible, les adaptations évolutives peuvent être le seul mécanisme de survie possible.

Les microorganismes, tels que les bactéries, les archées et les microalgues, avec des populations de grande taille et une génération asexuée rapide ont un potentiel d'adaptation élevé. (David, 2019).

II.4. Conséquences d'élévation des températures sur les microorganismes :**II.4.1. Les gradients thermiques font varier la distribution et la diversité des organismes marins :**

Chaque organisme a une température optimale de vie et les hypothèses étaient que l'élévation des températures provoquerait le déplacement vers les pôles des communautés adaptées aux environnements froids.

Des travaux récents semblent indiquer que les températures optimales des phytoplanctons des eaux polaires et tempérées sont beaucoup plus élevées que les températures environnementales : un modèle éco-évolutif a prédit que les températures optimales du phytoplancton tropical seraient substantiellement supérieures aux valeurs expérimentales observées.

La température optimale est cependant, en général, un mauvais indicateur de l'état physiologique des organismes et de leur adaptation écologique aux environnements.

II.4.2. La sensibilité aux pathogènes peut dépendre de la température :

Une étude en mésocosme a ainsi identifié des variations de la diversité des virus qui infectent *E. huxleyi* dans le cas de températures élevées, même si tous les mécanismes d'interactions ne sont pas décryptés.

II.4.3. La concentration des ribosomes cellulaires chez le phytoplancton eucaryote diminue en cas de températures élevées :

Ces ribosomes ont la particularité d'être particulièrement riches en phosphates. Comme la biomasse du phytoplancton eucaryote est d'environ 1 Gigatonne de carbone, la diminution des ribosomes sous pression climatique modifiera le ratio azote phosphate et affectera la ressource dans l'océan mondial.

Le réchauffement climatique réduit la teneur en fer des cyanobactéries fixatrices d'azote, avec des implications potentiellement importantes pour la fourniture d'azote aux réseaux trophiques.

II.5. L'élévation des niveaux de CO₂ :

Induit des réponses différentes en fonction des phytoplanctons, par exemple, entre le phytoplancton de l'Arctique et le phytoplancton antarctique

En effet, l'augmentation des niveaux de CO₂ :

- augmente généralement la croissance du phytoplancton, en induisant également des changements génétiques irréversibles sur le long terme (4-5 ans), comme chez les cyanobactéries marines de genre *Trichodesmium*, avec augmentation de la fixation de l'azote et de la croissance ;
- affecte les structures des populations avec des changements dans les écotypes et l'occupation de niches, ce qui modifie les réseaux trophiques et les processus biogéochimiques des cycles (par exemple chez *O. tauri*), ce qui peut provoquer la rupture des équilibres des écosystèmes. Une expérience de terrain a par exemple démontré que l'augmentation des niveaux de CO₂ procurait un avantage sélectif à une microalgue toxique, *Vicicitus globosus*, entraînant la perturbation du transfert de matière organique entre les niveaux trophiques. (Danovaro et al,2016).

II.6. L'acidification des océans :

Provoquée par l'absorption du CO₂, a augmenté d'environ 0,1 unité de pH depuis l'ère préindustrielle avec des réductions supplémentaires de 0,3 à 0,4 unités prévues d'ici la fin du siècle ; Elle met les microorganismes marins dans des conditions de pH très différentes de leurs conditions historiques récentes, ce qui leur demande plus d'énergie pour maintenir stable leur pH intracellulaire (homéostasie).

Les espèces moins aptes à réguler leur pH interne seront donc plus affectées avec des effets sur la taille de l'organisme, l'état d'agrégation, l'activité métabolique et la croissance ; Un pH plus bas active en effet préférentiellement, chez les bactéries et les archaeobactéries, les gènes responsables de l'entretien des cellules plutôt que les gènes de croissance.

D'autres expériences ont confirmé que les bactéries engagent plus de ressources pour l'homéostasie du pH dans les milieux oligotrophes, c'est-à-dire pauvres en ressources, qui correspondent à la majeure partie des océans. La variation des conditions de pH a aussi des effets sur les virus cyanophages qui les infectent. froids et les recherches doivent donc continuer pour permettre de comprendre comment les microorganismes s'adapteront au réchauffement.

III. Les effets des microorganismes sur le climat varient dans les biomes terrestres :

Dans le cas général, l'augmentation des niveaux de CO₂ atmosphérique favorise une plus grande décomposition microbienne et une rétention moindre du carbone organique dans le sol et renforce la concurrence pour l'azote entre les plantes et les micro-organismes.

III.1. Les effets des microorganismes au niveau des sols :

Les sols stockent environ 2000 milliards de tonnes de carbone organique. Les microorganismes du sol régulent la quantité de carbone organique stockés dans le sol et relâchés dans l'atmosphère. Ils influencent ainsi indirectement le stockage du carbone dans les plantes et les sols *via* la fourniture d'azote et de phosphore ; Un niveau de CO₂ plus élevé dans l'atmosphère augmente la productivité primaire et donc les litières forestières et racinaires, ce qui conduit à une augmentation des émissions de carbone dues à la dégradation microbienne de ces litières. La nature de la matière organique, en particulier la complexité du substrat, affecte la décomposition microbienne.

En outre, la capacité microbienne à accéder à la matière organique diffère selon le type de sol (par exemple, avec différents teneurs en argile) ; Le rapport entre le carbone disponible pour les microorganismes et le carbone stocké à long terme dépend de nombreux facteurs environnementaux, y compris les caractéristiques des minéraux du sol :

L'étude des profils de sol des dix premiers centimètres à un mètre (qui contiennent des stocks plus anciens de carbone) montrent que le réchauffement augmente les fuites de carbone dans l'atmosphère.

III.2. Les effets des microorganismes au niveau des plantes :

Les plantes sont à l'origine de la moitié de la production primaire mondiale nette. Une quantité importante du carbone ainsi produit est transférée aux champignons mycorhiziens avec qui les plantes sont en symbiose et, dans de nombreux écosystèmes, ces champignons transfèrent des quantités substantielles d'azote et de phosphore aux plantes ; À l'inverse, la respiration des plantes (60 Pg de carbone par an) et des microorganismes (60 Pg de carbone par an) libèrent du CO₂ dans l'atmosphère.

Les équilibres entre ces deux processus opposés, stockage de carbone dans la biosphère et respiration, (et donc la capacité de la biosphère terrestre à capturer et à stocker les émissions de carbone anthropiques) sont influencés par la température.

Dans l'état actuel des conditions environnementales, environ un quart des émissions anthropique de CO₂ sont stockées dans les écosystèmes et le réchauffement devrait accélérer la libération de carbone dans l'atmosphère.

Les plantes transfèrent au sol environ 50 % du carbone qu'elles fixent par photosynthèse, ce carbone est alors disponible pour la croissance microbienne.

En plus des microorganismes utilisant les exsudats⁵ comme sources d'énergie, ces mêmes exsudats peuvent rompre les associations organo-minérales, les molécules organiques ainsi libérées peuvent alors être utilisées pour la respiration microbienne, augmentant ainsi les émissions de carbone.

Ces interactions biotiques-abiotiques (plantes-minéraux notamment) doivent être prises en compte aux cotés des interactions biotiques (plantes-microorganismes) pour évaluer l'influence du changement climatique.

Les modèles thermodynamiques incorporant ces deux types d'interactions ont été utilisés pour prédire les rétroactions carbone-sol en réponse à l'augmentation de la température ; une étude comparant les deux types de modèles a montré plus de variations mais une influence plus faible du taux de carbone sur le climat dans les modèles thermodynamiques que dans les modèles statiques. (Mark et al, 2019).

III.3. Les effets des microorganismes au niveau des forêts :

Les forêts qui couvrent environ 30 % de la surface terrestre, contiennent environ 45 % du carbone terrestre. Elles sont à l'origine d'environ 50 % de la production primaire terrestre et séquestrent jusqu'à 25 % du CO₂ issu de l'activité anthropique.

La composition des communautés microbiennes, la densité de bois mort, la disponibilité de l'azote et l'humidité influencent l'activité microbienne (par exemple, la colonisation fongique du bois), ces éléments de régulation locaux doivent être incorporés dans les modèles de pertes de carbone sous forçage climatique ; La disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes influe sur la balance carbone des forêts, car moins les forêts sont riches en nutriments, plus les microorganismes seront nécessaires aux arbres pour les capter et donc plus ces derniers leur fourniront de carbone en échange (par exemple, sous forme d'exsudats racinaires), ce qui augmentera leur respiration et donc les émissions nettes de carbone.

III.4. Les effets des microorganismes au niveau des prairies :

Les prairies couvrent environ 29% des surfaces terrestres et stockent globalement du carbone.

III.5. Les effets des microorganismes au niveau des lacs :

Les lacs représentent environ 4 % de la zone non glaciaire et les lacs peu profonds émettent des quantités considérables de méthane (CH₄). Une étude de 15 ans en mésocosme simulant l'eau douce des environnements lacustres a déterminé que la combinaison des effets de l'eutrophisation et du réchauffement climatique pouvait entraîner une augmentation la libération de CH₄ (bulles de gaz) ; Comme les petits lacs sont susceptibles à l'eutrophisation et ont tendance à être situés dans des régions soumises au forçage climatique, le rôle des microorganismes lacustres dans la contribution mondiale aux émissions de gaz à effet de serre doit être évalué.

III.6. Les effets des microorganismes au niveau des tourbières :

Les tourbières issues de la décomposition de la litière végétale couvrent environ 3 % de la surface terrestre et, comme la productivité végétale de ces zones est supérieure à leur décomposition, les tourbières intactes fonctionnent en tant que puits de carbone mondial et pourraient contenir environ 30 % du carbone global des sols.

Néanmoins, les litières résistantes à la pourriture (par exemple, dans le cas de production d'antibiotique phénoliques et de polysaccharides par les sphaignes) inhibent la décomposition microbienne et la saturation de l'eau limite les échanges d'oxygène, favorisant la croissance des bactéries anaérobies et le dégagement de CO₂ et de CH₄.

L'augmentation des températures induira une réduction de la teneur en eau du sol, favorisant la croissance des plantes vasculaires et réduisant la productivité des mousses spécifiques des tourbières, ce changement dans la composition de la litière végétale et les

processus microbiens associés (par exemple, la réduction de la séquestration de l'azote et l'augmentation de la respiration hétérotrophe) sont en train de faire passer les tourbières de puits de carbone en sources de carbone. (Ricardo, 2019)

III.7. Les effets des microorganismes dans le pergélisol :

L'accumulation de carbone dans la matière organique (restes de plantes, animaux et microorganismes) dépasse de loin les pertes respiratoires, constituant ainsi le plus grand puits de carbone terrestre.

Un réchauffement climatique de 1,5 à 2°C par rapport aux températures moyennes de surface observées en 1850-1900 devrait réduire le pergélisol de 28–53 % par rapport aux niveaux observés entre 1960–1990, rendant ainsi de grands réservoirs de carbone disponibles pour la respiration microbienne et produisant des gaz à effet de serre.

La fonte et la dégradation du pergélisol :

- rendront disponibles aux organismes microbiens décomposeurs des sources de carbones actuellement gelées, libérant CO₂ et CH₄ ;
- entraîneront le largage de grandes quantités de carbone dans l'océan, avec potentiellement une augmentation des émissions de CO₂ par reminéralisation microbienne accrue et donc une boucle de rétroaction positive d'accélération du changement climatique ;
- entraîneront une libération d'eau et une saturation des sols favorisant la production anaérobie de CH₄ par les méthanogènes et la production de CO₂ par divers microorganismes.

Dans ces sols en cours de dégel, le métabolisme bactérien n'est pas aussi efficace que dans les sols aérobies drainés qui rejettent du CO₂ plutôt que CH₄. Cependant, une étude de laboratoire de sept ans a révélé qu'une fois les communautés méthanogènes devenues actives, des quantités égales de CO₂ et de CH₄ se sont formés dans des conditions anoxiques, ce qui laisse penser que d'ici la fin du siècle, les émissions de carbone des environnements anoxiques vont accélérer le changement climatique plus fortement que les environnements aérobies.

III.8. Les effets des microorganismes concernant les herbivores invertébrés et mammifères :

Les herbivores invertébrés et les mammifères prélèvent de la matière organique et influent donc sur sa disponibilité pour la biomasse microbienne.

Par exemple, les criquets diminuent la biomasse végétale et la demande des plantes en azote, augmentant ainsi l'activité microbienne. Le changement climatique peut réduire l'herbivorie, en raison des modifications globales des cycles de l'azote et du carbone qui réduisent la séquestration terrestre du carbone. (Atwood, 2015)

III.9. Les effets des microorganismes concernant les détritivores :

Les détritivores ont une influence sur les gaz à effet de serre par effet indirect sur les plantes et les microorganismes du sol.

Les vers de terre, par exemple, améliorent la fertilité du sol en se nourrissant, fouissant et déposant leurs rejets ; L'environnement intestinal anaérobie des vers de terre abrite des microorganismes qui dénitrifient les protéines et produisent du N₂O, ce qui peut entraîner une augmentation des émissions nettes de gaz à effet de serre, alors que les effets combinés de l'augmentation des températures et la diminution des précipitations réduit les émissions en agissant sur l'alimentation des détritivores et la respiration microbienne.(Frank,2019)

IV. Les effets du changement climatique sur les microorganismes dans les biomes terrestres :

IV.1. L'influence du changement climatique sur la structure et la diversité des communautés microbiennes ainsi que leurs fonctions :

Directement (par exemple, saisonnalité et température) ou indirectement (par exemple, composition des plantes, des litières et exsudats racinaires) à travers plusieurs facteurs interdépendants, tels que la température, les précipitations, les propriétés du sol et les apports des plantes.

La diversité microbienne du sol influence la diversité des plantes et est importante pour les fonctions des écosystèmes, y compris le cycle du carbone.

Des températures plus élevées favorisent des taux plus élevés de décomposition de la matière organique terrestre.

L'effet de la température n'est pas seulement un effet sur la cinétique microbienne (vitesse de croissance) mais résulte aussi d'un apport positif des végétaux sur la croissance microbienne.

Des changements importants dans les communautés bactériennes et fongiques ont ainsi été observés dans les sols forestiers dont la température moyenne annuelle est supérieure à 20 °C

et dans les sols de prairies d'herbes hautes sous forçage climatique ; Quelques études montrent une accumulation de carbone due au réchauffement mais la plupart font état d'une balance négative entre respiration microbienne et productivité primaire aboutissant à un rejet net de carbone dans l'atmosphère, cependant, il est nécessaire de bien préciser l'échelle de temps considérée.

En effet, le réchauffement qu'il soit de court terme ou de long terme (plus de 50 ans = réchauffement géothermique naturel) augmente tout d'abord la croissance et la respiration des microorganismes du sol, entraînant une libération nette de CO₂ et un épuisement des substrats, puis, dans un second temps, une diminution de la biomasse et une diminution de l'activité microbienne, donc une diminution des émissions de CO₂.

IV.1.a. Dans les sols forestiers :

Une étude de 26 ans sur le réchauffement des sols forestiers montre une variation temporelle dans la décomposition de la matière organique et le relargage de CO₂, entraînant des modifications des communautés microbiennes, une réduction de l'efficacité de l'utilisation du carbone, une réduction de la biomasse microbienne et de l'accessibilité du carbone ; Cette étude prédit que le changement climatique anthropique sera responsable de la libération prolongée et stable de carbone.

Des prédictions similaires proviennent de modèles de systèmes terrestres simulant les réponses physiologiques microbiennes ou incorporant les effets de gel et dégel des sols de climat froid. (Frank, 2019).

IV.1.b. Dans les sols désertiques :

La ressource carbone est limitée. Une augmentation des apports en carbone par les plantes favorise donc la transformation de composés azotés, la biomasse microbienne, la diversité (par exemple de champignons), l'activité enzymatique et l'utilisation de matière organique complexe.

Bien que ces changements puissent augmenter la respiration et donc la perte nette de carbone des sols, les caractéristiques spécifiques des sols arides et semi-arides pourraient leur permettre de fonctionner comme des puits de carbone.

IV.1.c. Dans des sites prairies tempérées :

Une étude de 19 sites de prairies tempérées a révélé que des différences saisonnières dans les précipitations limitaient l'accumulation de biomasse.

IV.1.d. Dans la toundra :

Le potentiel des communautés microbiennes de la toundra change de façon marquée au bout d'un an et demi de réchauffement, avec une activité plus forte des gènes impliqués dans les décompositions aérobie et anaérobie du carbone et le cycle des nutriments ; Quand les forêts se développent dans les régions de toundra qui se réchauffent, leur croissance peut produire une perte nette de carbone, probablement le résultat d'exsudats racinaires stimulant la décomposition du carbone du sol par les bactéries.

IV.1.e. Le réchauffement rapide de la péninsule antarctique et de ses îles :

A entraîné une expansion de l'aire de répartition de l'herbe antarctique (*Deschampsia antarctica*) ; En effet, cette plante rivalise avec les espèces indigènes (par exemple la mousse *Sanionia uncinata*) par la capacité supérieure de ses racines à acquérir des peptides⁷ et donc de l'azote.

La capacité de l'herbe à être compétitive dépend de la dégradation des protéines par les microorganismes et la production d'acides aminés, de nitrate et d'ammonium ; Des sols plus chauds dans cette région abritent une plus grande diversité fongique, le changement climatique devrait provoquer des changements dans les communautés fongiques qui affecteront le cycle des éléments nutritifs et la productivité primaire. (Elisa, 2012).

IV.2. Les réponses de la respiration microbienne aux changements de température :

- Deux études ont évalué les effets de températures élevées sur les taux et les mécanismes de respiration microbienne et leurs conséquences sur l'adaptation bactérienne, *via* l'examen d'une large plage de températures ambiantes (- 2 à 28 °C), dans les sols asséchés (110 échantillons) et les sols boréaux, tempérés et tropicaux (22 échantillons). Les chercheurs ont évalué comment les communautés bactériennes réagissaient à trois températures différentes, entre 10 et 30 °C, et ont mis en évidence que l'adaptation thermique était liée aux caractéristiques biophysiques des membranes cellulaires et des enzymes (compromis activité-stabilité) et au potentiel génomique des microorganismes, les environnements plus chauds ayant des communautés microbiennes avec des modes de vie plus diversifiés.

- Les taux de respiration par unité de biomasse étaient inférieurs dans les sols des environnements à haute température, indiquant que l'adaptation thermique des communautés microbiennes peut diminuer les rétroactions climatiques positives. Cependant, comme la respiration dépend de multiples facteurs interdépendants (et pas de la seule variable température), un tel mécanisme de physiologie microbienne devrait être inséré dans les modèles biogéochimiques.

IV.3. Les réponses de la croissance microbienne aux changements de température :

L'efficacité de la croissance microbienne est une mesure de l'efficacité avec laquelle les microorganismes convertissent la matière organique en biomasse : une efficacité moindre signifie que plus de carbone est libéré dans l'atmosphère.

Les études ne sont pas toutes concordantes :

- Une étude en laboratoire d'une semaine a révélé que l'augmentation de la température conduit à une augmentation du taux de renouvellement des microorganismes sans augmentation de l'efficacité de leur croissance (les microorganismes sont plus nombreux mais pas plus efficaces individuellement) et conclue que le réchauffement favorisera donc l'augmentation de la biomasse bactérienne et donc l'accumulation de carbone dans le sol.

Au contraire, une étude de terrain de 18 ans a révélé qu'une température de sol plus élevée entraînait l'apparition de substrats plus complexes à dégrader et donc réduisait l'efficacité de la croissance microbienne entraînant sur le moyen, long terme une perte nette associée du stockage de carbone dans le sol. (**Cecile et Gregg,2015**).

IV.4. Le changement climatique est susceptible d'augmenter la fréquence, l'intensité et la durée des proliférations de cyanobactéries :

Dans de nombreux lacs, réservoirs et estuaires eutrophes, les cyanobactéries produisent une variété de neurotoxines, hépatotoxines et dermatotoxines qui peuvent être mortels pour les oiseaux et les mammifères (y compris le bétail et les chiens) et menacent l'utilisation des eaux pour les loisirs, la boisson et l'irrigation agricole et les pêcheries.

De nombreuses cyanobactéries peuvent se développer à des températures relativement élevées.

L'augmentation des stratifications thermiques des lacs et des réservoirs leur permet de flotter vers le haut et de former des agrégats de surface denses, ce qui leur donne un meilleur accès à la lumière et donc un avantage sélectif sur les organismes phytoplanctoniques non-flottants.

Les sécheresses durant l'été augmentent le temps de résidence de l'eau dans les réservoirs, les rivières et les estuaires, et ces eaux chaudes stagnantes fournissent des conditions idéales pour la prolifération cyanobactérienne.

La réorganisation des communautés vers les espèces productrices de toxines ou l'augmentation de la production de toxines par les espèces existantes pourrait affecter les lacs d'eau douce polaires, où les cyanobactéries sont souvent les producteurs primaires benthiques dominants.

Les cyanobactéries toxiques ont ainsi provoqué d'importants problèmes de qualité de l'eau, par exemple au lac Taihu (Chine), au Lac Érié (États-Unis), au Lac Okeechobee (États-Unis), au Lac Victoria (Afrique) et dans la mer Baltique.

La diversité des cyanobactéries benthiques et la production de toxines dans les péninsules Antarctique et Arctique a augmenté après six mois d'exposition à des températures croissantes.

La capacité du genre de cyanobactérie *Microcystis* à s'adapter à des niveaux élevés de CO₂ a été démontrée à la fois en laboratoire et sur le terrain. La compétitivité des souches de *Microcystis spp.* a été reliée à la concentration de carbone inorganique dans les carboxysomes *via* l'absorption du CO₂ et du HCO₃. (Janet, 2019)

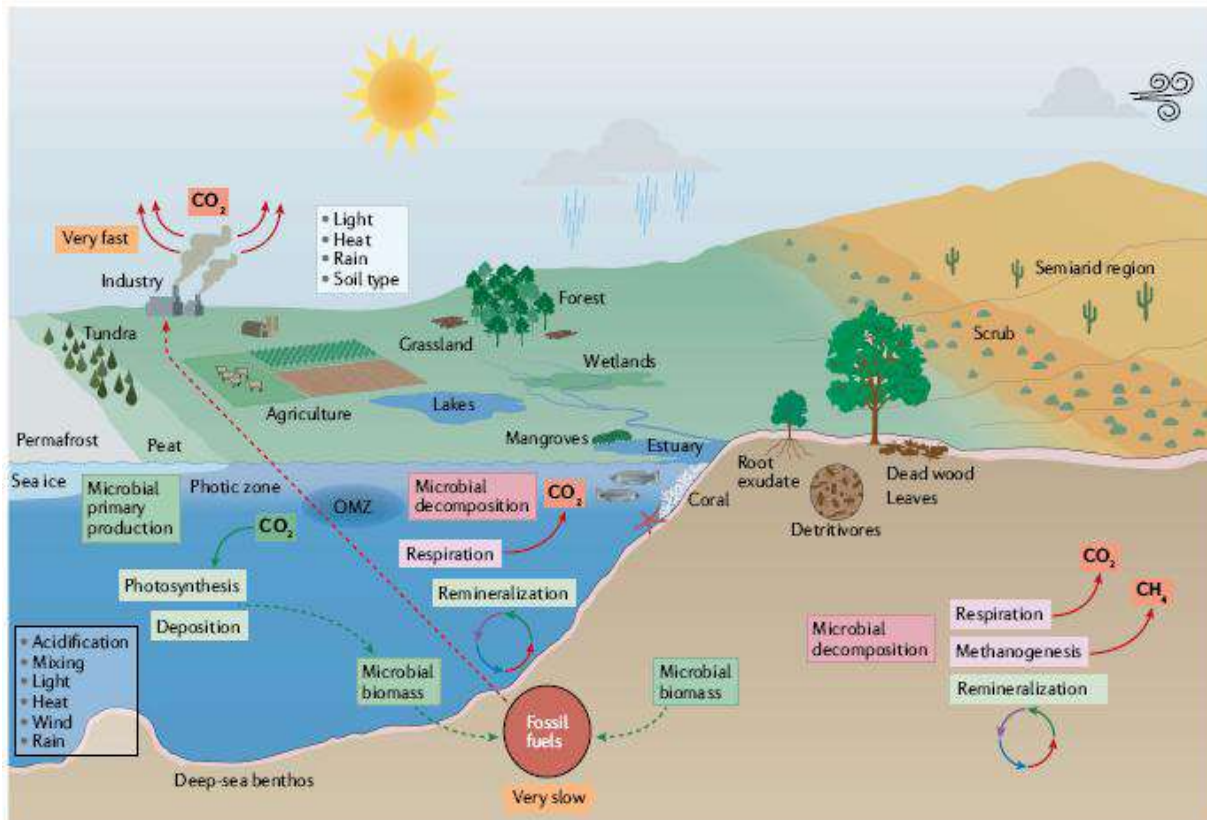


Figure 53 : microorganismes et changements climatiques dans les biomes marins et terrestres

V. Les effets des microorganismes sur le changement climatique dans les biomes agricoles :

V.1. Production de méthane :

Le méthane, CH_4 , est produit par deux sources principales : les microorganismes méthanogènes et les combustibles fossiles. Les microorganismes produisent du méthane dans des environnements anaérobies naturels et artificiels (sédiments, sols saturés d'eau comme les rizières, tractus gastro-intestinal des animaux, en particulier les ruminants, installations de traitement des eaux usées et installations de biogaz).

Par ailleurs, l'utilisation des combustibles fossiles et l'utilisation d'engrais a considérablement augmenté la disponibilité environnementale de l'azote, perturbant les processus biogéochimiques globaux et faisant peser une menace sur les écosystèmes. Ce même méthane est dégradé par oxydation atmosphérique et oxydation microbienne dans les sols, les sédiments et l'eau.

Les niveaux atmosphériques de CH₄ ont fortement augmenté ces dernières années (2014-2017), faisant peser une menace sur notre capacité à contrôler le changement climatique et ce pour plusieurs raisons : augmentation des bactéries méthanogènes, augmentation des combustibles industriels fossiles ou réduction de l'oxydation atmosphérique de CH₄.

V.2. Emissions de N₂O, un puissant gaz à effet de serre :

Ce gaz est libéré par oxydation microbienne et réduction de l'azote. L'enzyme N₂O réductase présente dans les rhizobactéries des nodules racinaires ou autres microorganismes du sol peut convertir le N₂O en N₂, un gaz inerte. Mais, quand cette enzyme n'est pas exprimée ou active, du N₂O peut être relargué dans l'atmosphère.

Or, le changement climatique perturbe les ratios des transformations microbiennes de l'azote (décomposition, minéralisation, nitrification, dénitrification et fixation) et favorise donc le relargage de N₂O dans l'atmosphère. Il y a un urgent besoin de connaître les effets changements globaux sur les transformations microbiennes des composés azotés.

VI. Les effets du changement climatique sur les microorganismes

Les pratiques agricoles ont évolué d'une gestion extensive (peu de travail, engrais et capital) à une gestion intensive (beaucoup de travail, engrais et capital).

VI.1. L'augmentation des températures et de la sécheresse :

Affecte fortement la capacité à faire pousser des cultures. Les réseaux trophiques basés sur les champignons (communs dans les systèmes extensifs comme les prairies) sont plus en mesure de s'adapter à la sécheresse que les réseaux trophiques à base de bactéries (courants dans les systèmes intensifs comme la culture de blé).

Une évaluation globale de la terre arable a révélé que les champignons et les bactéries du sol occupaient des niches spécifiques et réagissaient différemment aux précipitations et au pH du sol, indiquant que le changement climatique aurait des impacts différents sur leur abondance, leur diversité et leurs fonctions.

VI.2. L'aridité :

Qui devrait augmenter en raison du changement climatique, réduit la diversité et l'abondance des bactéries et des champignons et donc le potentiel fonctionnel global des communautés, limitant ainsi leur capacité à soutenir la croissance des plantes.

VI.3. Les effets combinés du changement climatique et de l'eutrophisation causés par les engrais :

Peuvent avoir des effets importants, potentiellement imprévisibles sur la compétitivité microbienne. Par exemple, l'enrichissement en nutriments favorise généralement les proliférations d'algues.

Un résultat différent a été observé dans le lac de Zurich, relativement profond. La réduction du phosphore provenant des engrais a réduit les proliférations de phytoplancton eucaryote, mais, en augmentant les ratios azote/phosphore, a favorisé la dominance de la cyanobactérie non fixatrice d'azote *Planktothrix rubescens* qui n'a pas pu être contrôlée par prédation.

En effet, le réchauffement augmentant la stratification thermique, le mélange des communautés a été réduit, ce qui a diminué la prédation et donc favorisé la persistance des cyanobactéries toxiques. (Mark et al, 2019)

VII. L'atténuation du changement climatique par les microorganismes :

Une meilleure compréhension des interactions microbiennes contribuerait à la conception de mesures visant à atténuer et contrôler le changement climatique et ses effets.

- En agriculture, les progrès dans la compréhension de l'écophysiologie des microorganismes qui réduisent le N₂O en diazote inoffensif fournit des options pour atténuer les émissions.
- L'utilisation de souches bactériennes, naturelles ou génétiquement modifiées avec une activité N₂O réductase renforcée peut réduire les émissions de N₂O provenant du soja.
- La manipulation du microbiote du rumen et les programmes de sélection sont des possibilités pour réduire les émissions de méthane par les bovins, sous réserve de trouver des lignées de bétail qui favorisent les communautés microbiennes produisant moins de méthane sans affecter la santé et la productivité des animaux.
- Le développement des protéines fongiques peut remplacer la viande qui est la production la plus productrice de méthane.
- Les biochars, produits par la conversion thermochimique de la biomasse en conditions anoxiques⁸, améliorent la stabilisation et l'accumulation de la matière organique dans les sols riches en fer. Le biochar améliore également la rétention de matière organique en

réduisant la minéralisation microbienne et l'effet des exsudats de racines sur la rupture des liaisons organo-minérales. Les biochars favorisent donc la croissance des herbes et la réduction du dégagement de carbone.

- L'utilisation à grande échelle de zones humides aménagées pour la production de biocarburant cellulosique utilisant les rejets d'azote provenant du traitement des eaux usées peut contribuer à l'atténuation du changement climatique. Si tous les déchets chinois étaient ainsi utilisés, ils pourraient fournir l'équivalent de 7 % de la consommation d'essence chinoise ; De tels aménagements nécessiteraient la caractérisation et l'optimisation de communautés microbiennes adaptées à l'enjeu.

La mise en œuvre de ces solutions sera sans aucun doute facilitée par l'amélioration de la compréhension par le public des rôles clés des microorganismes dans le réchauffement climatique, c'est-à-dire par l'acquisition de connaissances en microbiologie.(Atwood,al.2015)

VIII. Un nouveau type de bactérie lutte contre le changement climatique et les polluants du sol :

VIII.1. Les bactéries qui pourraient lutter contre les polluants du sol :

Des chercheurs de l'Université Cornell et du Lycoming College ont découvert un nouveau type de bactérie du sol qui est particulièrement apte à décomposer la matière organique, y compris les produits chimiques cancérigènes produits par la combustion du charbon, du gaz, du pétrole et des déchets.

La nouvelle bactérie a été nommée *Madseniana* en l'honneur du regretté scientifique Gene *Madsen*, qui a commencé cette recherche - sans la terminer - qui a récemment été publiée dans le "Journal of Systemic and Evolution Microbiology" le 6 février.

Toutes les plantes et tous les animaux, y compris les humains, contiennent une multitude de bonnes bactéries qui nous aident à digérer les aliments et à combattre les infections.

Les bactéries du sol aident non seulement les plantes à pousser, à faire face au stress et à lutter contre les parasites, mais sont également essentielles pour comprendre le changement climatique.



Figure 54: Préparer l'environnement nécessaire à la croissance de la bactérie *madciniana* pour étudier sa structure cellulaire (Uric Alert, 2020)

"Les microbes ont commencé à apparaître sur Terre il y a environ quatre milliards d'années", explique Dan Buckley, professeur d'écologie microbienne au Département des sciences des sols et des cultures de l'Université Cornell, comme l'a rapporté PhysOrg ; Ils étaient également la raison de la création de l'état du système dans laquelle nous vivons, de plus il a maintenu sa continuité.

Les bactéries récemment découvertes appartiennent au genre *Paraburkholderia*, connu pour décomposer les composés aromatiques. Certains types de ces bactéries peuvent également former des nodules racinaires qui fixent l'azote atmosphérique dans le sol.

Cette étude a commencé lorsque *Madsen* a pu isoler ce type de bactérie du sol de la forêt expérimentale de Cornell sur Turkey Hill, tandis que l'équipe de Buckley a ensuite terminé le projet ; Dans un premier temps, l'équipe a étudié la séquence du gène de l'ADN ribosomique de la bactérie, ce qui a fourni aux scientifiques des preuves génétiques que *madciniana* était unique.

Les chercheurs ont noté que *madciniana* a une capacité particulière à décomposer les hydrocarbures aromatiques qui forment la lignine, qui est le principal composant de la biomasse végétale et de la matière organique du sol.

Les hydrocarbures aromatiques sont également présents dans les polluants organiques appelés hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), ce qui signifie que cette espèce de bactérie découverte pourrait être un membre actif de la recherche sur la biodégradation et un acteur important du cycle du carbone du sol.



Figure 55: Les bactéries aident les plantes à pousser et à combattre les parasites (*Pixabay*).
(**Uric Alert, 2020**)

-Le pourcentage de carbone dans le sol :

Pour comprendre la nature du cycle du carbone à travers le sol et l'atmosphère, Buckley déclare : "Nous savons très peu de choses sur le fonctionnement des bactéries du sol. Chaque année, les sols produisent environ sept fois plus de carbone que toutes les émissions et déchets humains provenant des voitures, des centrales électriques et des unités de chauffage dans le monde entier.

« Tout est causé par la décomposition naturelle de la matière végétale. Parce que tant de carbone est passé dans le sol, de petits changements dans la façon dont le sol gère tant de carbone peuvent avoir un impact important sur le changement climatique.

C'est pourquoi le laboratoire de Buckley s'est concentré sur l'étude de la relation symbiotique entre les bactéries *madciniana* et les arbres forestiers. Alors que les arbres fournissent du carbone aux bactéries, *madciniana* décompose la matière organique du sol, produisant des nutriments importants pour les arbres tels que l'azote et le phosphore.

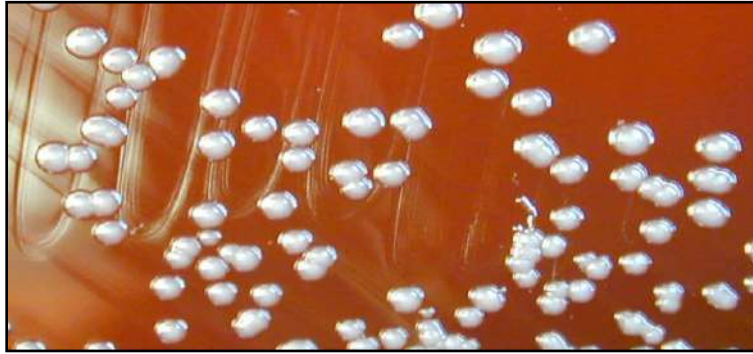


Figure 56: Une famille de bactéries paraprotocordries connues pour leur capacité à décomposer les composés aromatiques (Mohamed, 2020).

Par conséquent, une meilleure compréhension de la façon dont les bactéries analysent le carbone dans le sol pourrait être la clé de la durabilité des sols et de la capacité de prédire l'avenir du climat mondial. (Mohamed, 2020).

VIII.2. Les bactéries qui pourraient lutter contre le changement climatique :

Les lacs produisent d'importantes quantités de gaz à effet de serre, en particulier de méthane, dont l'impact est plus de vingt fois supérieur à celui du dioxyde de carbone (CO₂) ; Une surface de lac d'un kilomètre carré peut émettre 800 fois plus de méthane qu'une surface identique d'un océan.

Des scientifiques suisses ont découvert par hasard que des bactéries nuisibles, généralement présentes dans l'eau des lacs, consomment le puissant gaz à effet de serre avant qu'il ne soit libéré dans l'atmosphère.

-Les émissions de gaz à effet de serre des étendues d'eau douce sont énormes :

On estime que les émissions totales de gaz à effet de serre provenant de l'eau douce représentent environ 22% des émissions mondiales de méthane et environ les trois quarts de toutes les émissions naturelles. Ces dernières représentent celles qui ne sont pas directement produites par les activités humaines, telles que les transports ou la production alimentaire.

Le méthane et d'autres gaz à effet de serre sont produits par la décomposition des matières organiques au fond des lacs. La faible teneur en oxygène des profondeurs des lacs favorise la production de méthane. La quantité émise est déterminée par la quantité de matière

organique, la température et plusieurs autres facteurs tels que la profondeur sous la surface, le type de sol et les conditions topographiques.

-Une découverte accidentelle :

En juin 2017, lors de recherches menées dans les lacs suisses de Zoug et du Rotsee, une équipe de scientifiques de l'Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux (Eawag) a découvert par hasard un nouveau facteur intervenant dans le processus subaquatique d'oxydation du méthane.

Il s'avère que les bactéries filamenteuses du genre *Crenothrix* sont responsables de la consommation d'une grande partie du méthane hydrique avant qu'il n'atteigne l'air ; Également connues sous le nom de ferrobactéries, car elles peuvent obstruer les conduites d'eau en fer, ces bactéries sont normalement considérées comme une nuisance.

Schubert, qui faisait partie de l'équipe de chercheurs, précise: «Il semble que nous ayons totalement sous-estimé le rôle de cette bactérie dans les cycles biogéochimiques.» ; Les scientifiques n'avaient jamais cherché ces bactéries dans les eaux lacustres et l'équipe de l'Eawag ne les a décelées que par hasard.

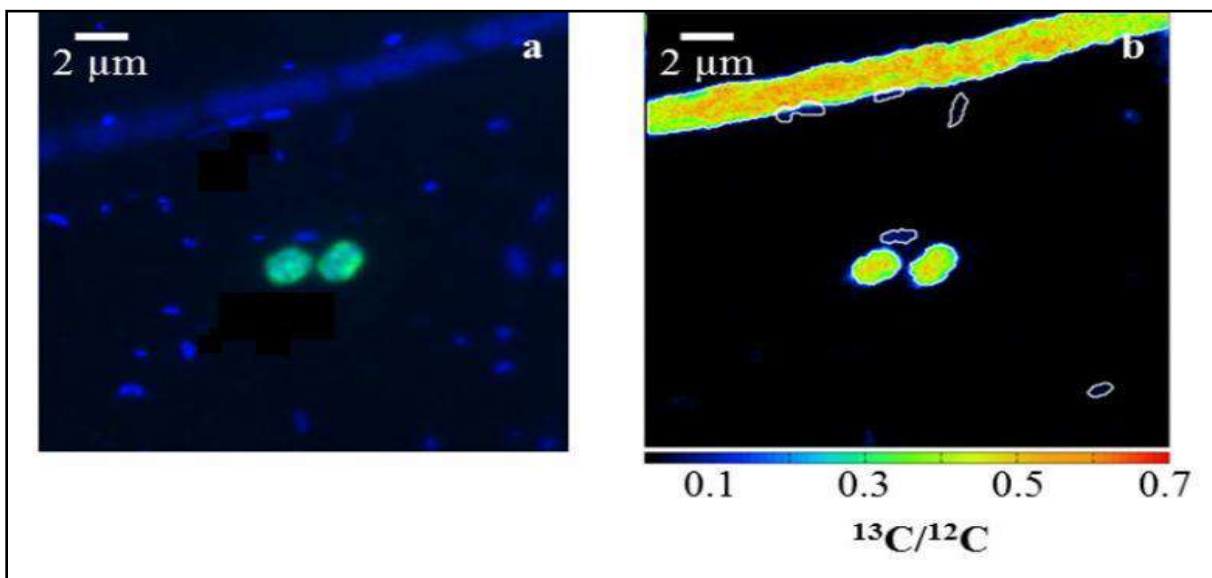


Figure 57: Bactéries *Crenothrix* (Eawag, 2017).

Les chercheurs essayaient de quantifier l'élimination du méthane subaquatique au moyen d'un isotope stable. Pour ce faire, ils ont marqué certaines molécules de méthane avec des atomes

lourds de carbone 13. Les atomes de carbone marqués ont ensuite été observés dans des bactéries, en utilisant le procédé de la spectrométrie de masse ; L'équipe s'attendait à trouver le carbone 13 dans de petites bactéries rondes. Mais les chercheurs ont été surpris de l'identifier également dans les longues bactéries filamenteuses du genre *Crenothrix*.

-Trouver les mêmes bactéries dans deux types de lac différents est encourageant :

Les chercheurs ont déclaré que leur étude démontre sans ambiguïté le rôle prépondérant de ces organismes dans la réduction des émissions de méthane de deux lacs stratifiés.

Carsten Schubert explique: «La découverte de *Crenothrix* n'a pas encore été confirmée dans d'autres systèmes. Jusqu'à présent, nous l'avons identifiée dans deux lacs, lesquels sont fondamentalement différents.

D'une part, le lac de Zoug est profond et la lumière du soleil ne pénètre pas plus profondément que l'oxycline, un niveau en dessous duquel il n'y a plus d'oxygène, où la concentration de méthane est plus grande et l'eau plus froide. Le Rotsee est moins profond et la lumière du soleil parvient plus bas que l'oxycline. Il est très encourageant de déceler des bactéries du genre *Crenothrix* dans ces deux environnements différents.»

-Observer les bactéries dans leur environnement :

Carsten Schubert est prudent. «Les bactéries qui oxydent le méthane sont très particulières et nécessitent des conditions très spécifiques ; Il est trop tôt pour imaginer que ces organismes pourraient être introduits artificiellement dans les lacs pour oxyder le méthane afin de réduire les émissions des étendues d'eau douce.»

La prochaine étape consiste pour les chercheurs à observer si ces bactéries peuvent avoir une activité semblable dans plusieurs environnements. Il est en outre nécessaire d'examiner ces bactéries de près dans ces différents environnements pour mieux comprendre comment elles consomment le méthane. (DFAE, 2019).

Conclusion

Conclusion :

Ce travail de mémoire de Master avait pour objectif d'étudier l'impact des microbes dans la variation des climats ainsi sa rôle dans ce changement.

Les micro-organismes sont impliqués dans beaucoup de procédés environnementaux comprenant le cycle d'azote et de carbone. Ils sont abondants dans presque tous les environnements comprenant l'air, saleté, les profondeurs abyssales de l'océan, profondes sous la surface terrestre, et dans les environnements qui s'échelonnent largement en température, pression, et composition chimique. On l'estime qu'il y a quelque chose dans la région de $\sim 10^{30}$ bactéries et archéobactéries totales sur terre.

On découvre que les microbes jouent un rôle majeur dans la production et la consommation des gaz à effet de serre puissants comprenant le CO₂ et le méthane, ont des réactions de négatif et de réaction positive aux changements de température, et jouent un fonctionnement indispensable dans le règlement de l'acidité d'océan. Toute la ces derniers peut souffrir des perturbations dues au changement climatique anthropogène. Elle a également des rôles importants en agriculture et chaîne alimentaire.

Pour mettre à jour un écosystème global sain, des microbes il est extrêmement important. Comprenant les interactions complexes des biomes microbiens avec des organismes plus élevés (particulièrement centrales) et comment ces communautés des microbes peuvent être affectées par le changement climatique est pour cette raison critique.

Les demandes basées sur microbien de technologie de climat-atténuation sont également un domaine de recherche de plus en plus important.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques :

- Agence de l'environnement et de la maîtrise d'énergie ADEME**, le changement climatique 10 deux question : comment limiter la hausse des températures et s'adapter (**guide pratique**),19aout 2019, ISBN 979-10-297-1410-8, pg11-12-13.
- Alain Foucault**, Climatologie et Paléoclimatologie : Cours Master • CAPES • Agrégation, 1^{ère} édition, Paris (2009), ISBN 978-2-10-054165-2. Page 101-105,pg 221.
- Journal Algérien des Régions Arides (JARA)**,Climat et changement climatique ,Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides CRSTRA, Biskra, Algérie,Numéro special 2016,p10.
- Anonyme¹** : Cours de Bactériologie Générale, Espace Etudiant, [en ligne]
URL : . <http://www.microbes-edu.org/etudiant/intro.html>.
- Anonyme²** : <https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr/definition/micro-organisme/#definition>
- Anonyme³** : http://www.ecosociosystemes.fr/cellule_bacterienne.html.
- Anonyme⁴**, [en ligne] URL: <https://www.futurasciences.com/sante/dossiers/biologie-bacteries-leur-monde-nous-1433>,pg 3.
- Anonyme⁵** : climats (notions de base) France, 2021, [en ligne]
URL : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/climats-notions-de-base> ,
- Anonyme⁶** : <https://science7.blogspot.com/2016/11/les-facteurs-climatiques>.
- Atwood, T. B**, Predators help protect carbon stocks in blue carbon ecosystems. Nauret. Climare. Change, 28 septembre 2015.
- Ayoub, Bensakhrya**: les algues, magazine scerence, 2018.
- Blöchl, E. Rachel, R. Burggraf, S. Hafenbradl, D. Jannasch H., Stetter K**: *Pyrolobus fumarii*, gen. and sp. nov., represents a novel group of archaea, extending the upper temperature limit for life to 113°C, semantic scolare, 1997.
- Bertrande Dassonville**, Climat, Comprendre le réchauffement climatique pour agir (2013), France, ISBN 978-2-7472-2004-0.
- Blackford JC** (2010) predicting the impacts of ocean acidification: Challenges from an ecosystem perspective. *Journal of Marine Systems* (vol 81),pg 12-18.
- Caldeira K, Wickett ME** (2003) Oceanography: Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* (vol 425) pg 365-365.
- Cecile sercerine rousseaux & Gregg, W. W**. Recent decadal trends in global phytoplankton composition. *Global Biogeochem. Cycles* **29**, 1674–1688 ,23 septembre 2015.
- Clément Bertrand**, Comme on entend la mer, Conte musical maritime Dès 8 ans, Théâtre du Mantois, festival les Franco, 05/2017, Pg08 .

-Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), Le climat , « l'histoire climatique de la terre voit alterner périodes chaudes et froides. reste à déterminer les raisons et les impacts de ces évolutions », 2013, pg.26.

-Corentine .alauzet : taxonomie des bactéries anaérobies : de la reclassification a la decouverte de nouveaux pathogenes, université de lorraine, (6 novembre 2009), pages 44/46

-Costello Anthony, Mustafa Abbas, Adriana Allen, Sarah Ball, Sarah Bell, Richard Bellamy, Sharon Friel, Nora Groce, Anne Johnson, Maria Kett, Maria Lee, Caren Levy, Mark Maslin, David McCoy, Bill McGuire, Hugh Montgomery, David Napier, Christina Pagel, Jinesh Patel, Jose Antonio Puppim de Oliveira, Nanneke Redclift, Hannah Rees, Daniel Rogger, Joanne Scott, Judith Stephenson, John Twigg, Jonathan Wolff, Craig Patterson. Managing the health effects of climate change: Lancet and University College London, Institute for Global Health Commission. Lancet, 2009, pg 373.

-Danovaro Roberto, Massimiliano Molari, Cinzia Corinaldesi, Antonio Dell'Anno : drivers of archaea and bacteria in benthic deep- sea ecosystems, 2^e edition, (2016).

-Département fédéral des affaires étrangères DFAE, 26 avril 2019, URL <https://houseofswitzerland.org/fr/swissstories/environnement/les-bacteries-qui-pourraient-lutter-contre-le-changement-climatique>.

-Dominique Berteaux, Changements climatiques et biodiversité du Québec, Presses de l'Université du Québec, 2014,pg34.

-Dominique Dron et Carla Hirschhorn, L'homme et le climat(1), institut Montaigne, MARS 2002,page 20-21.

-Elisa. Schaumi, bjorne. Rost, andrew. J.millar, sinéad. Collins : Variation in plastic responses to ocean acidification in a globally distributed picoplankton species. Nature. Climate , (23 decembre 2012), pages 298–302.

-Frank,james stewart : microorganismes and climate change, scientists warning to humanity, (2019).

-Jacques Beauchamp,l'Atmosphère, Université de Picardie Jules verne, France, 2005.

-Janet.Jansson, Nature Review Microbiology, l'article Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change, (2019), Pages 569-586, URL : <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0222-5> / <https://www.nature.com/articles/s41579-019-0222-5>.

-Jeanne Camirand et Christine Gingras , Agriculture et climat, un projet nature ouébec, canada, mars 2011,

URL :http://www.naturequebec.org/ressources/fichiers/Agriculture/fermes_zerocarbone_2011/TXT11-03_refChangClimat.pdf.

- Janine guespin –michel** : conditions de vie des bactéries : l'adaptation, futura science, (9/12/2019), page 4.
- Jean-Louis Fellous**, le climat en question, Comment peut-on définir le climat
fonctionnement du climat 8 octobre 2013,
URL : <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/fonctionnement-climat/definir-climat-par-jean-louis-fellous#top>.
- Jean Loup puget, René blanchet, Jean salençon, Alain carpentier**, Académie des sciences, le changement climatique, institut de France , (26 octobre 2010) , pg2.
- Jean Poitou et Pascale Braconnot**, les mots du climat[en ligne] ISBN (ebook) : 978-2-7598-2545-5, (2021), pg30.
- Hamel. khalissa**, science pour l'architecture cours N03 intitulé : le climat, université de biskra faculté des sciences et de technologie département d'architecture , (2014),
- Hamon.dujardin**, : taxonomie bactérienne (2014).
- ITSBioT**, Chapitre2: Morphologie et ultra structure des bactéries
(<https://studylibfr.com/doc/327463/chapitre-2---morphologie-et-ultrastructure-des-bact%C3%A9ries>),2013 .
- Gastronomiac**, 2021, Genève
URL : https://www.gastronomiac.com/ustensiles_et_vocabu/pression-atmospherique/
- GIEC, (2007)**. Bilan 2007 des changements climatiques. Rapport de synthèse n.4, 114p
- GIEC,(2014)**, changement climatique 2014, Rapport de synthèse, pg 45 ,42,48.
- Greenfacts(facts on health and the environment),2007**
URL:<https://www.greenfacts.org/fr/changement-climatique-re4/1-2/1-causes-naturelles-humaines.htm#0>
- Labat D, Goddérés Y, Probst JL, Guyot JL** (2004) Evidence for global runoff increase related to climate warming. Advances in Water Resources vol 27,pg 631-642.
- Michael Madigan et John Martinko**, Biologies des microorganismes, Pearson Education France, 11^e édition, (2007).
- Michel Mazoyer, archives Larousse**, climat : les climats du monde [en ligne]
URL :https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/climat__les_climats_du_monde/185927
- Medecine Sorbonne université**, chapitre01 l'anatomie fonctionnelle des bactéries2003,
- Mark J Hovenden , Sebastian Leuzinger , Paul C D Newton , Andrew Fletcher 2 , Simone Fatichi , Andreas Lüscher Peter B Reich , Louise C Andresen , Claus Beier, Dana M Blumenthal , Nona R Chiariello , Jeffrey S Dukes , Juliane Kellner , Kirsten Hofmockel , Pascal A Niklaus , Jian Song , Shiqiang Wan , Aimée T Classen , J Adam Langle** : Globally consistent influences of seasonal precipitation limit grassland biomass response to elevated CO₂, Nat. Plants, (2019), pages 167/173 .

-Martin Beniston (2012), Changements climatiques et impacts, De l'échelle globale à l'échelle locale, 2^e édition revue et mise à jour, Presses polytechniques et universitaires romandes, (2012) pg35.

-Mohamed. chaabane : Bactéries-lutte-changement-climatique et polluants (2020), URL .

-Mayer A, Deina j, Bernard A, cours de microbiologie générale avec problème et exercices corrigés, biosciences et techniques, 2004. ISBN : 2-7040-1170-2.

-Nathalie Mayer (journaliste), Climat océanique[en ligne],Futura-sciences2001-2021 URL :<https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-climat-oceanique-16838/>

-Orr JC, Fabry VJ, Aumont O, Bopp L, Doney SC, Feely RA, Gnanadesikan A, Gruber N, Ishida.A, Joos F, Key RM, Lindsay K, Maier-Reimer E, Matear R, Monfray P, Mouchet A, Najjar RG, Plattner G-K, Rodgers KB, Sabine CL, Sarmiento JL, Schlitzer R, Slater RD, Totterdell IJ, Weirig M-F, Yamanaka Y, Yool A,(2005) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. Nature,(vol:437) pg:681-686

-Paul, singleton, bactériologie pour la médecine, la biologie, et les biotechnologies ; sciences sup, 6^e édition, (2005).

-Pachauri RK, Reisinger A. Climate change 2007: Synthesis report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate A. (eds.)). IPCC, Geneva, Switzerland, pg104 .

-Patrick Linder, Karl Perron, Candice Yvon, Les microbes pour Le meilleur & pour Le pire une exposition, université de Geneve, 2021.

-Pier vellinga , le changement climatique, mythes, réalités et incertitudes, Editions de l'université de bruxelles, (2011), pg 55, ISBN978-2-8004-1535-2.

-Ricardo Cavicchioli, microorganisms and climate change, Scientists' warning to humanity, (2019),

-Rouabhi Amar, Bioclimat et changement climatiques, université ferhat abbas - setif1, 2019, pg10. pg5-6, pg34.

-Rouag-Saffidine Djamila, caractérisation et qualité des ambiances urbaines : les ambiances environnementales, cours 1^{ère} année post-graduation, université de Biskra (2007/2008), pg 03.

-SAFA.Aissa, cours de Climatologie, 3^{ème} année LMD, université d'Oran, 2013/2014 pg 16-pg 5.

-SAFA.Aissa, cours de Climatologie, 3^{ème} année LMD, université d'Oran, Résumé du chapitre « Les précipitations page 2017 /2018.

-Serge Planton, Causes enjeux du changement climatiques, Université virtuelle environnement et développement durable (UVED), 2020,pg1-2.

-Sabine Cristopher.L, Feely Richard.A, Gruber Nicolas, Key Robert M, Lee Kitack john.L, Bullister JL, Wanninkhof Rik, Wong.C.S, Wallace Douglas.W.R, Tilbrook Bronte, Millero

Frank.J, Peng T-H, Kozyr Alexander, Ono Tsueno, Rios Aida.F , The oceanic sink for anthropogenic CO₂. Science, (vol 305), pg 367-371.

-Université Catholique de Louvain (UCL), Rapport machine climatique,dossier pédagogique, Mars 2017,pg2-3-4-7-10.

-Université PARIS-VI Pierre et Marie Curie,Faculté de Médecine Pitié-Salpêtrière, bactériologie, chups.jussieu, niveau DCEM1 , (2003) ,pages 9/10.

-Université PARIS-VI Pierre et Marie Curie,Faculté de Médecine Pitié-Salpêtrière, bactériologie, chups.jussieu, niveau DCEM1 , (2003) ,pages 10/17.

-Yahiaoui Bilal, Cours de Microbiologie générale, (2014/2015), pages 2/4 ;

-Yahiaoui Bilal, cours de microbiologie générale, (2014-2015), pages 20/22

-URIC alert : Préparer l'environnement nécessaire à la croissance de la bactérie madciniana pour étudier sa composition cellulaire, (25/2/2020).

-Yves Fouquart, Le climat de la terre, Presses universitaires du Septentrion , Villeneuve d'Ascq(France), 2003, (p. 59-84).