

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger



Département Génie de l'Environnement

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'environnement

Mémoire de master en Génie de l'Environnement

Thème :

***Les bactéries extrêmophiles et leurs applications dans
l'environnement.***

Présenté par :

MESKHER Hicham

Encadré par : Y.DJEMAI -ZEGHLACHE

Soutenu publiquement le 29/06/2017

Composition du jury :

Président :	N.BELHANECHÉ	Professeur (ENP)
Encadreur :	Y.DJEMAI -ZEGHLACHE	MCB (ENP)
Examineur :	A.CHERGUI	Professeur (ENP)
Examinatrice:	S.AROUA	MCB (ENP)

ENP 2017

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger



Département de Génie de l'Environnement

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement

Mémoire de master en Génie de l'Environnement

Thème :

***Les bactéries extrêmophiles et leurs application dans
l'environnement.***

Présenté par :

MESKHER Hicham

Encadré par : Y.DJEMAI- ZEGHLACHE

Soutenu publiquement le 29/06/2017

Composition du jury :

Président :	N.BELHANECHÉ	Professeur (ENP)
Encadreur :	Y.DJEMAI -ZEGHLACHE	MCB (ENP)
Examinateur :	A.CHERGUI	Professeur (ENP)
Examinatrice:	S.AROUA	MCB (ENP)

ENP 2017

DEDICACE

À la mémoire de mon très cher père,

À ma très chère mère,

À mes frères et mes sœurs,

À mes nièces et mes neveux

À tous mes proches,

À tous mes amis,

À tous ce que j'aime beaucoup.

Je dédie ce modeste travail

HICHAM

Remerciements

Je tiens à remercier, en premier lieu, Dieu le tout puissant m'ayant accordé santé, courage et bonne foi afin que je puisse achever ce modeste travail.

Si ce mémoire a connu le jour, c'est grâce à Madame Y.DJEMAI- ZEGHLACHE Maitre-de conférence

à l'École Nationale Polytechnique d'Alger; mon promoteur académique

A cet effet, j'aimerais vivement la remercier pour la qualité de ses conseils et

Pour avoir été aussi disponible et patiente.

Mes remerciements vont ensuite à Madame .N.BELHANECHÉ professeur à L'ENP, qui m'a fait

L'honneur d'accepter d'être président de jury de ce travail.

Je révèle également ma profonde gratitude à Mr. A.CHERGUI, professeur à L'ENP et Mme S.AROUA Maitre-de conférence à L'ENP, qui ont acceptés d'examiner mon travail.

Je tiens aussi à adresser mes remerciements les plus sincères à toute l'équipe pédagogique qui m'a accompagné tout au long de ma formation à l'École Nationale.

Polytechnique pour la qualité d'enseignement prodigué et l'engagement dont ils ont fait preuve.

En outre, Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué afin que je parvienne au bout de ce manuscrit

ملخص:

الكائنات الدقيقة عديدة في الطبيعة، فإنها يمكن أن تتحدى قوانين البيولوجيا وتزدهر في البيئات القاسية. يتم تصنيفها بصفة عامة القاسية. الكائنات الحية الدقيقة متطرفة تنتمي إلى هذه الكائنات استثنائية، المقاومة والتكيف مع الظروف القاسية (الحموضة، والحرارة والبرودة، والملوحة، والإشعاع، الضغط) يمنح خصائص مثيرة للدهشة، والتي يكشف عن تطبيق التكنولوجيا الحيوية أصول حقيقية.

كلمات مفتاحية: الظروف القسوى، التكيف، التكنولوجيا الحيوية، الملوحة القسوى، الحرارة القسوى، البيئات القاسية

ABSTRACT :

Microorganisms are innumerable in nature; they can challenge the laws of biology and thrive in extreme environments. They are generally described as extremophiles. Extreme microorganisms are among these exceptional beings, their resistance and their adaptation to these extreme conditions (acidity, alkalinity, heat, cold, salinity, radiation, pressure) give them specific characteristics, which Reveals a truly biotechnological application asset.

Key words: Extremophile, adaptation, biotechnology. Hyperhalophilia, hyperthermophilia, extremes environments

RESUME :

Les microorganismes sont innombrables dans la nature, ils peuvent défier les lois de la biologie et prospérer dans des environnements extrêmes. Ils sont globalement qualifiés d'extrémophiles. Les microorganismes extrêmes font partie de ces êtres exceptionnels, leur résistance et leurs adaptations aux conditions extrême (Acidité, Alcalinité, Température, Salinité, Rayonnement, Pression) leur confère des caractéristiques étonnantes, ce qui révèle un véritable atout dans l'application biotechnologique.

Mots clés : Extrémophile, adaptation, biotechnologie. hyperhalophilie, hyperthermophilie, milieux extrêmes.

TABLE DE MATIERES

Liste des tableaux

Liste des figures

1. INTRODUCTION.....	10
2. LES MILIEUX EXTREMES :.....	13
2.1. Définition et classification :.....	13
2.2. Le facteur température :.....	13
2.2.1. Les milieux chauds :.....	13
2.2.2. Les milieux froids :	15
2.3. le facteur pH.....	15
2.3.1 les milieux acides.....	15
2.3.2.les milieux alcalins :.....	16
2.4. Les milieux salés.....	16
2.5. Le facteur pression.....	18
2.6. Les milieux à fort rayonnement.....	18
2.7. Les milieux extrêmes en Algérie (Les sebkhas):.....	19
2.7.1. La sebkha :.....	19
2.7.2. Situation géographique en Algérie.....	20
2.7.3. Exemple de Sabkha (La sabkha de Sétif).....	21
3. LES MICROORGANISME EXTREMOPHILES :.....	23
3.1. Biodiversité du monde vivant:.....	24
3.2. Diversités des Archaea:.....	25
3.3. Les diversités métaboliques des extremophiles.....	26
3.4. Les caractéristiques cellulaires des archées :.....	26
3.4.1. Le métabolisme :.....	26
3.4.2. Parois et membranes cellulaires :.....	27
3.4.3. Les éléments génétiques :.....	27
3.4.3.1. Les éléments transposables.....	27
3.4.3.2. Les plasmides.....	28
3.5. Types métaboliques.....	28
3.5.1 Halophilie extrême et adaptation :.....	28
3.5.2. Thermophilie extrêmes et adaptation :.....	30
3.5.3 Alcalophilie et acidophilie extrême et adaptation:.....	31
3.5.3.1. Microorganismes acidophiles et adaptation :.....	31

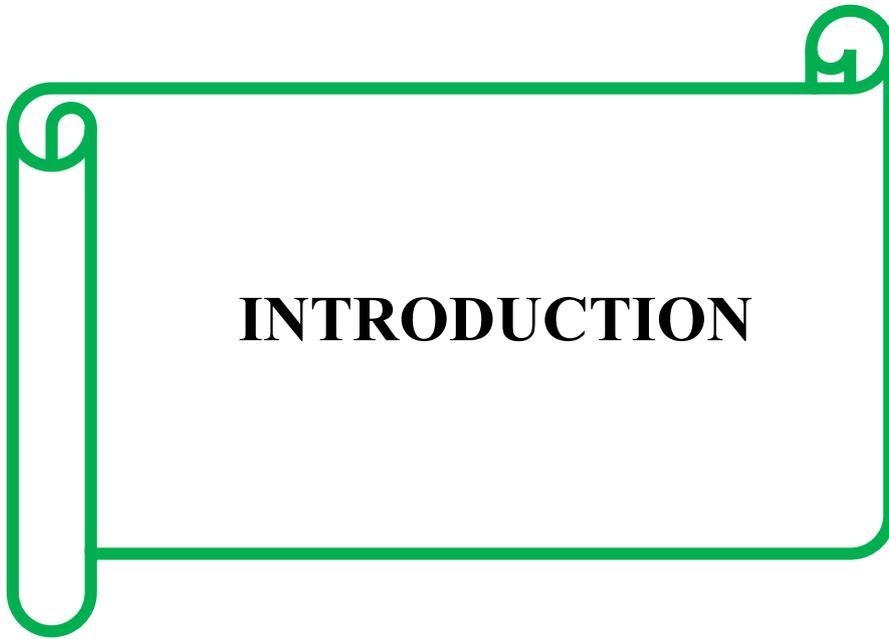
3.5.3. 2. Microorganismes alcalophiles et adaptation :	31
3.5.4. Barophilie et adaptation :	32
3.5.5. Polyextremophilie:	33
4. INTERET ET APPLICATION DES MICROORGANISMES EXTREMOPHILES EN ENVIRONNEMENT:	36
4.1. Enzymes :	36
4.2. Biodégradation des résidus :	37
4.3. Traitement des minerais :	38
4.4. Alternative aux pesticides :	39
4.5. Production de polymère:	40
4.6. Applications basées sur les cellules entières :	41
4.6.1 Production d'hydrogène :	41
4.6.2. Production de solutés compatibles :	41
CONCLUSION	43
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	45

Liste des figures :

Figure N°	Titre	Page
Figure 2.1 :	Parc national de Yellowstone.....	14
Figure 2.2 :	Bactérie thermophile grossie au microscope électronique.....	14
Figure 2.3 :	Eucaryote photosynthétique: l'algue rouge , <i>le cyanidium caldarium</i>	15
Figure 2.4 :	Filaments de la cyanobactérie <i>oscillatoria</i>	16
Figure 2.5 :	Coloration rose provenant de l'archée <i>Halobacterium salinarum</i>	17
Figure 2.6 :	Souche bactérienne radio résistante (<i>Deinococcus Radiodurans</i>).....	19
Figure 2.7 :	Cartographie des sebkhas Algériennes	20
Figure 3.1 :	Arbre phyllogénétique des êtres vivants.....	24
Figure 3.2. :	Terminologie des extrémophiles en fonction de la température et du pH	26

Liste des tableaux :

Tableau N°	Titre	Page
Tableau 3.1:	Comparaison entre <i>Archaea</i> , <i>Bacteria</i> et <i>Eucarya</i>	25
Tableau 3.2 :	Conditions extrêmes et microorganismes appropriés.....	34



INTRODUCTION

1. INTRODUCTION :

Dans la nature, les microorganismes, de par leur spécificité, leurs propriétés uniques et leur grande diversité métabolique sont innombrables et abondent dans différents types d'habitats. Cela inclut des habitats tels que le sol, l'eau, l'air et même l'espace.

Podar et Reysenbach en 2006 notent que jusqu'au 20^{ème} siècle, on pensait que la vie n'était possible que dans un environnement normal qui présente des conditions compatibles avec la vie de l'homme, puis, les chercheurs ont commencé à découvrir que certains environnements extrêmes tels que les régions volcaniques, les océans polaires, les lacs salés, les sources hydrothermales, les milieux à haute pression ou dans le cas contraire ; c'est-à-dire dans des milieux à très faible pression (les milieux sous vide) et, les milieux alcalins ou acides qui s'avèrent trop rigoureux pour le développement d'une vie, sont colonisés par certains microorganismes en dépassant toutes les limites physicochimiques de la vie. C'est le cas de Thomas Brock, qui, dans les années 60, a isolé une espèce thermophile qui a pris une place importante dans l'avancement de la biologie moléculaire : *Thermus aquaticus*. Cette espèce a été découverte dans les sources thermales du Parc de Yellowstone aux États-Unis, c'est une source de la célèbre enzyme Taq polymérase, utilisée pour l'élongation des brins d'ADN à haute température au cours de la Polymerase Chain Reaction (PCR) .

Ces êtres vivants exceptionnels qui défient les lois de la biologie et créent la vie supplémentaire là où l'homme n'osait l'imaginer, sont qualifiés d'extrémophiles (Echigo et al., 2005) et ils ne sont pas seulement tolérants à ces conditions extrêmes, mais celles-ci sont requises pour leur croissance et développement. Selon les conditions extrêmes auxquelles les microorganismes extrémophiles sont confrontés, ils peuvent être thermophiles, psychrophiles, alcalophiles, acidophiles, piézophiles halophiles ou halotolérants... (Irwin et Baird, 2004) .De plus, ils peuvent prospérer dans des biotopes combinant plusieurs conditions extrêmes, ils sont alors baptisés « poly-extrémophiles ». Ce qualificatif englobe la résistance à des conditions physiques (par exemple la température, la pression, les radiations) et géochimiques (par exemple la dessiccation, la salinité, le pH) (Mesbah et al, 2009).

Toutes ces aptitudes rendent les microorganismes extrémophiles intéressants dans plusieurs domaines, ainsi, outre leur intérêt écologique évident, ils sont un véritable atout dans le domaine des biotechnologies. En effet, de nombreux procédés industriels se déroulent dans des conditions de température, de pression ou encore de pH extrêmes, or les bactéries

extrêmophiles ou leurs enzymes utilisées traditionnellement ne sont actives justement que dans un domaine restreint de conditions de température, pression. On doit, aussi, mentionner leur capacité remarquable dans le domaine de dépollution ; où ils peuvent fonctionner comme agents de dépollution et de traitement des eaux usées issues de l'industrie pétrolière, poissonnière et même les eaux usées urbaine et les eaux salées.

Ces microorganismes extrêmophiles présentent aussi dans le cadre de développement durable, et par conséquent dans le domaine de l'environnement, un intérêt non négligeable. On peut les rencontrer dans la production de bioéthanol, la gestion et la valorisation des déchets, la production des bio-surfactants et des polymères (le bioplastique). Ils sont également appliqués dans les processus de la bio-lixiviation et la production des métaux. Ils sont aussi exploités dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique, dans la production des détergents, la dégradation et la saccharisation d'amidon.

A ce titre et vu l'importance de ces microorganismes extrêmophiles sur le plan de la taxonomie et sur la production biotechnologique, notre attention s'est portée sur l'étude bibliographique de ces microorganismes et leurs applications possibles dans le domaine de l'environnement.

Pour atteindre l'objectif voulu, ce travail de mémoire vise à :

- ✚ Définir les milieux extrêmes et leurs caractéristiques physiques et géographiques.
- ✚ Décrire les microorganismes extrêmophiles par leurs caractères morphologiques, biochimiques et physiologiques.
- ✚ Faire ressortir leurs applications biotechnologiques possibles dans le domaine de l'environnement.



**LES MILIEUX
EXTREMES**

2. LES MILIEUX EXTREMES :

2.1. Définition et classification :

Le milieu ou le biotope est un "lieu de vie" relativement stable identifié par un certain nombre de caractéristiques géologiques, géographiques et climatologiques qui vont déterminer les conditions de vie des êtres qui y vivront.

En dehors des conditions physico-chimiques « normales » la vie existe. Les organismes qui se développent dans ces biotopes « hostiles » sont globalement qualifiés d'extrémophiles. Ils ont dû s'adapter à des valeurs extrêmes d'un ou de plusieurs paramètres physico-chimiques. On peut citer par exemple la température pour les hyperthermophiles qui croissent de manière optimale au-dessus de 80 °C, près des geysers ou près des cheminées volcaniques. A l'inverse, les psychrophiles préfèrent des températures inférieures à 15 °C. Les barophiles peuvent supporter des pressions allant jusqu'à 1000 atmosphères dans les grands fonds marins. Les halophiles se développent dans des environnements où la concentration en sels approche de la saturation. Les méthanogènes qui sont des anaérobies se rencontrent dans les aires de décomposition. Les autres paramètres physico-chimiques sont le pH, l'absence d'eau, les radiations ou un environnement chimique particulier (forte concentration en métaux, atmosphère de CO₂, etc.). Mais parmi les domaines les plus étudiés de l'extrémophilie se trouvent les hautes températures (thermophilie) ainsi que les fortes salinités (halophilie).

Un environnement extrême est un environnement caractérisé par des paramètres physico-chimiques hostiles à la vie en général, mais qui permettent à quelques espèces de croître de façon optimale nommés les extrémophiles. Ces facteurs limitants provoquent une spécialisation des espèces et/ou une diminution de la biodiversité existante.

A l'heure actuelle les principaux paramètres physico-chimiques pris en considération pour classer les milieux extrêmes sont : la température, le pH, la teneur en eau, la pression et l'osmolarité ou la concentration en sel.

2.2. Le facteur température :

2.2.1. Les milieux chauds :

Un milieu chaud est un milieu où règnent des conditions de vie qui sont mortelles pour la plupart des organismes sauf les organismes thermophile extrêmes ; par ce que la température d'un tel milieu est proche ou supérieure à 100 °C.

Les sources thermales terrestres, hydrothermales côtières ou océaniques profondes (fumures noires) dont les températures peuvent, pour les premières, aller jusqu'à 100°C et, pour les dernières, 350°C du fait des pressions hydrostatiques rencontrées, ces milieux peuvent être définis comme étant des environnements chauds à extrêmement chauds.

Les sources thermales terrestres et côtières sont très répandues sur tous les continents dans les régions au volcanisme actif. Les sources hydrothermales profondes océaniques sont majoritairement situées sur les dorsales médio-océaniques actives (dorsale Médio-Atlantique) ou les sites arrière-arcs actifs. Ces sites ont les milieux de prédilection des thermophiles et des hyperthermophiles (figure 2.1). De plus, de nombreuses sources présentent des pH acides, voire très acides où se développent des acidophiles et/ou des acido-thermophiles.



Figure 2.1, Parc national de Yellowstone (Castle Geyser en éruption, Parc national de Yellowstone, Wyoming, USA, //fr.wikipedia.org/wiki/Parc_national_de_Yellowstone).

Quelques rares sources hydrothermales, telle que Lost City (dorsale Médio-Atlantique) présentent des pH alcalins qui supportent le développement des souches alcaliphiles ou alcali-thermophiles comme le montre la figure 2.2. Les sources hydrothermales les plus profondes connues (Ashadzé, 4 100 m) ont en outre permis d'isoler des souches telles que *Pyrococcus yayanosiise* se développant uniquement dans une gamme de pression de 20 à 120 MPa, qualifiées de piézophiles (ou barophiles) strictes sont appelés hyperthermophiles.



Figure 2.2 Bactérie thermophile grossie au microscope électronique (Brock, 1993).

On les trouve dans les régions volcaniques et dans les sources hydrothermales continentales. La plupart proviennent principalement des fonds marins, au niveau des sources hydrothermales des dorsales océaniques.

2.2.2. Les milieux froids :

Un milieu froid est un milieu à des conditions de vie normales qui sont mortelles pour la plupart des organismes sauf les organismes psychrophiles extrêmes ; par ce que la température de ce milieu est proche ou inférieure à 15 °C. Ces températures basses (< 15°C) déterminent donc le groupe des psychrophiles (qui aiment le froid). Ce groupe rassemble les espèces de micro-organismes ne se développant qu'à basse température, voire à des températures légèrement négatives. Les milieux concernés sont les grands fonds océaniques, les zones de haute altitude en montagne et les zones polaires. Les vallées sèches de l'Antarctique constituent des écosystèmes particulièrement originaux, de nombreuses espèces vivent en harmonie dans ce milieu très froid.

2.3. Le facteur pH :

2.3.1 Les milieux acides :

Les milieux acides ou les environnements des acidophiles englobent les lacs acides, les cheminées hydrothermales, sources chaudes à production de sulfures ; les organismes qui vivent dans ce type de milieu sont dits acidophiles. **La figure 2.3** représente Lemonade Spring (YellowStone Park) tapis microbien de 1 cm à 42°C, formé par une algue thermophile et acidophile (pH 2-3): *Cyanidium*.

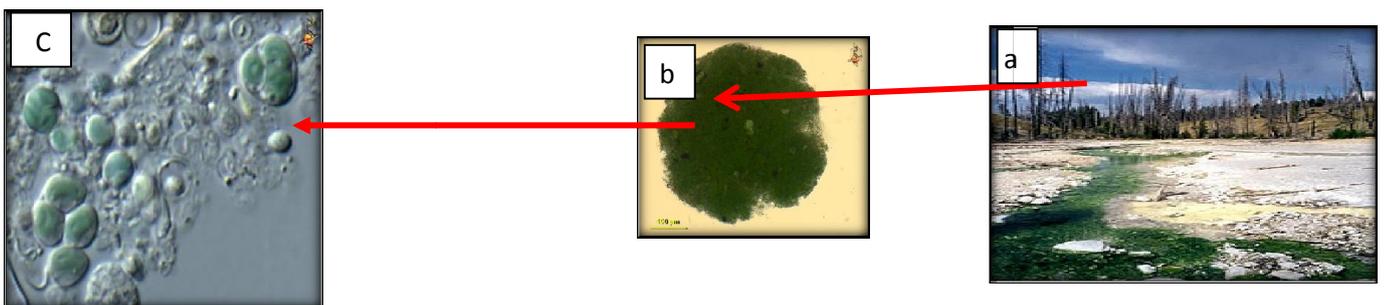


Figure 2.3 Un microbe eucaryote photosynthétique: l'algue rouge, *Cyanidium caldarium* (Patterson et al, 2011)

- (a) : La rivière Lemonade Spring de Yellow Stone (Les États-Unis).
- (b) : L'échantillon du tapis microbien pris.
- (c) : Vue microscopique de l'échantillon.

2.3.2. Les milieux alcalins :

Les milieux basiques ou les environnements où vivent des espèces alcalophiles sont caractérisés par des zones de pH supérieur à 9 qui englobent les sols riches en carbonate et les lacs de soude. Comme exemple typique représentant ces écosystèmes : le lac natron

Situé au nord de la Tanzanie, le lac Natron est, à la différence de la plupart des lacs (qui contiennent de l'eau douce), un lac salé. Autrement dit, il contient de l'eau recelant de grandes quantités de sel, ce qui permet à cette eau d'arriver dans le lac, mais lui empêche de s'en échapper. Elle peut seulement se dissiper par évaporation. Dans le monde, les lacs salés sont peu fréquents. Les plus connus sont la Mer Morte, le Grand Lac Salé en Amérique ou encore la Mer Caspienne. En revanche, contrairement à ces derniers, le lac Natron est extrêmement alcalin. Cela signifie que son pH est supérieur au pH neutre. D'après les mesures réalisées par des scientifiques, le pH du lac est de 10,5, soit presque aussi élevé que celui de l'ammoniaque qui est de 11,6. Si le milieu est si alcalin, c'est à cause des grandes quantités de natron (mélange de soude et de bicarbonate de sodium) contenues dans l'eau.

Les espèces qui y vivent sont alcalophiles.

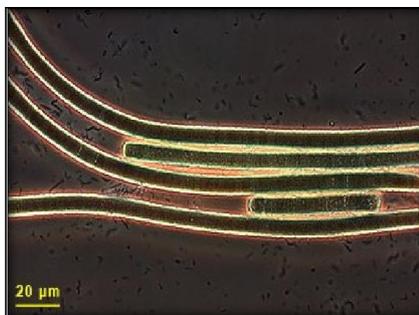


Figure 2.4 Filaments de la cyanobactérie *Oscillatoria* « algue verte » (Brett Leigh, 2010)

2.4. Les milieux salés :

Les habitats hypersaliens se trouvent dans le monde entier et sont typiques d'environnements extrêmes, y compris les lacs salins, salternes et les sols salins et hypersalins (Oren, 2002a). Le Sahara algérien se compose de nombreux écosystèmes extrêmes, y compris ceux avec des sols hypersalines, tels que les chotts et les sebkhas, respectivement, des salines secs et des salières sur le littoral aride.

Les environnements hypersalins comprennent les eaux et les sols. Les eaux salées sont définies comme des environnements où les concentrations des sels sont supérieures à celle de l'eau de la mer, alors qu'il n'existe pas de dénomination claire pour les sols salins ou

hypersalins. Cependant, un sol serait considéré comme hypersalin lorsque sa concentration en sel dépasse un certain seuil : plus de 0,2% (w/w) de sels solubles (Kaurichev, 1980). Aussi, par rapport aux habitats aquatiques hypersalins, très peu d'information existe à ce jour concernant la diversité des micro-organismes halophiles et halotolérant isolés des sols salins

Les lacs de saumures sont divisés en deux groupes : thalassiques et athalassiques. Le premier groupe résulte de l'évaporation progressive de l'eau d'une mer ou d'un lac, ou de la redissolution d'évaporites en fond de mer par l'eau de mer surnageante. Les lacs athalassiques ont des compositions salines sans rapport avec celle de l'eau de mer. Pour le premier groupe, les concentrations en sel dépassent 5 % de NaCl. Ce sont les lieux de prédilection des espèces dites halophiles. Les lacs continentaux résultent de processus variés. Certains tels que la mer d'Aral sont des lacs continentaux en voie d'assèchement. D'autres comme la mer Morte sont issus d'un isolement tectonique (des eaux du golfe d'Aqaba pour la mer Morte) et subissent une salinisation progressive.

Les espèces qui y vivent sont dites halophiles. La plupart d'entre elles contiennent des pigments qui donnent à l'eau une couleur rose, orangée ou pourpre selon l'espèce.

Conditions de vie :

- ✓ Vertèbres : concentration en sel inférieure à 1,5M
- ✓ Halobactéries : de 1,5M à 3M
- ✓ Haloarchées : de 3M à 5,2M.

On peut citer comme exemple d'écosystèmes salés ; Grand lac salé,(Utah); lac Owens, (Californie); Lac rose, (Senegal);Lac Asal, (Djibouti); Mer morte.



Figure 2.5 Coloration rose provenant de l'archée *Halobacterium salinarum* (Calu., 2008)

2.5. Le facteur pression :

Une autre frontière particulièrement intéressante est celle de la limite de la vie dans les sédiments profonds du plancher océanique qui, en certains endroits en fonction de l'âge et de l'abondance de sédiments, peuvent atteindre 10 km d'épaisseur. Jusqu'en 1955 les chercheurs pensaient que la vie était impossible au-delà de 7 m de profondeur dans les sédiments. Grâce au projet international ODP (Ocean Drilling Project), les forages profonds ont mis en évidence la présence de groupes microbiens vivants jusqu'à des profondeurs de 1 600 m sous le plancher océanique. Les extrémophiles correspondants— piézo-thermo ou piézo-hyperthermophiles —, dont les signatures moléculaires ont été mises en évidence, n'ont toutefois pas pu être cultivés à ce jour.

Les organismes sont appelés piézophiles (ou barophiles). Ils sont présents dans les grands fonds ou dans la croûte terrestre.

On peut citer comme exemple de milieux à forte pression, les abysses qui désignent l'ensemble des zones très profondes d'un océan. Comme les caractéristiques environnementales de ces zones sont partout les mêmes, on utilise pour les dénommer globalement le terme abysses au pluriel. Aussi appelées grands fonds océaniques ou grandes profondeurs, les abysses occupent les deux tiers de la planète terre. Au singulier, un abysse correspond à un point de profondeur extrême, comme la fosse des Mariannes qui est l'abysse le plus profond connu (11 000 m).

La pression augmente d'environ 1 atm tous les 10 mètres, ce qui signifie que certaines zones peuvent atteindre des pressions de plus de 1 000 atm. La pression rend non seulement les grandes profondeurs très difficiles à atteindre sans aide mécanique, mais elle rend aussi l'étude des organismes adaptés à ces pressions énormes difficile. En effet, les organismes ramenés à la surface pour y être étudiés sont rapidement tués par la faible pression atmosphérique.

2.6. Les milieux à fort rayonnement :

Pour les organismes vivants, les rayonnements ionisants sont nocifs, et même mortels en cas de dose élevée. Les rayons ionisants sont de natures et de sources variées, leurs propriétés dépendent de la nature des particules constitutives du rayonnement et de leur énergie.

Un rayonnement ionisant est un rayonnement électromagnétique ou corpusculaire capable de produire directement ou indirectement des ions (une ionisation, consiste à créer des atomes ou des molécules de charge électrique positive ou négative) lors de son passage à travers la matière

On peut distinguer les rayonnements corpusculaires (ou particulaires) par le type de particule auquel ils sont associés. Il peut par exemple s'agir de neutrons, de protons, d'électrons (ou de positons), de particules alpha, de photons, de neutrinos ou de muons.

Il existe également des rayonnements ondulatoires comme les rayonnements électromagnétique (rayons X, lumière visible, etc.), les rayonnements acoustique (ou sonore), correspondent à la propagation d'énergie sous la forme d'une onde, ici une onde mécanique et les rayonnements gravitationnel (ondes gravitationnelles).

Une espèce capable de résister à de grandes radiations est appelée radio résistante.

L'espèce *Deinococcus radiodurans* est l'organisme le plus radio résistant au monde.

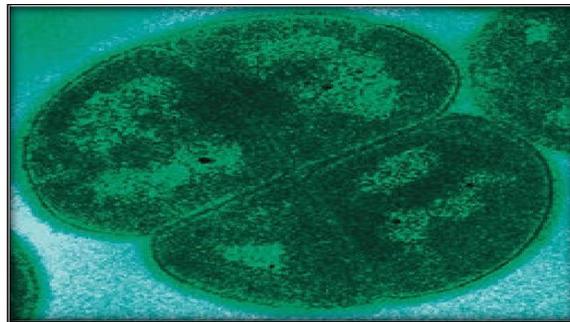


Figure 2.6 Souche bactérienne radio résistante *Deinococcus radiodurans* (D.Michael, 2006)

2.7. Les milieux extrêmes en Algérie

En Algérie les milieux extrêmes qui existent sont soit ceux à dominance salée à très salée dont l'exemple typique est la sebkha et le chott, soit des écosystèmes chauds notamment les eaux thermales qui représentent une ressource hydrique non négligeable pour notre pays.

2.7. 1. La sebkha :

Sebkha, en arabe, mot qui désigne les plaines salines soumises à des inondations périodiques. Dans les milieux désertiques, les dépressions ne sont occupées que temporairement par de l'eau. Une forte évaporation conduit à la formation caractéristique d'une croûte d'évaporites qui tapissent le fond de ces dépressions. Une sebkha désigne un bassin occupant le fond d'une dépression à forte salinité plus ou moins séparé d'un milieu marin, dans des régions arides (milieu supratidal). Néanmoins, il peut être toujours en contact par un très faible filet d'eau (bassin d'eau profond), ou au contraire par des infiltrations (bassin d'eau peu profond) dans ce cas il peut se produire des débordements périodiques d'eau vers le bassin. Dans les deux cas il va y avoir une augmentation de la salinité, une évaporation importante, l'apparition d'une saumure et la précipitation d'évaporites au fond du bassin si la profondeur est faible, ou à une

extrémité si la profondeur est importante. Ils se sont surtout situés au Nord de l'Afrique et dans le Moyen Orient.

2.7.2. Situation géographique des sebkhas et chotts :

En Algérie ils existent sept chotts et sebkhas dans différentes localités du Sahara algérien ont été recueillies de manière aseptique. On trouve le Chott Melghir (Biskra) dans le nord-est De Sahara Algérienne, Sebkhha Ezzmoul (Ain M'lila) dans le nord-est de l'Algérie, Sidi Ameur (Bousaâda) Chott Zahrez Gharbi (Djelfa) dans le nord du Sahara algérien, Chott Ouargladans le milieu de l'est de l'Algérie, Sebkhha ELGolea (El Menia) dans le centre du Sahara algérien et Sebkhha Adrar dans le sud-ouest de l'Algérie (figure 2.7).



Figure 2.7 Cartographie des sebkhas Algériennes (Quadri et al, 2016).

2.7.3. Exemple de sebkha : Sebkha de Sétif :

Le site se situe à 9 km au Sud de la ville d'El Eulma, il est limité à l'Ouest par le Djebel Braou culminant à 1263 m, au Nord par Merdjjet Ech-chtout haute de 920 m, au Sud par Koudiat Gueltet Ed Debba se trouvant à une altitude de 972 m et à l'Est par Mechtet Nouasser haute de 922. Localisé au Sud de 2 agglomérations, le village d'El Melah 3 km et 7 km de la ville d'El Eulma.

Elle couvre une superficie de 4379 ha et se situe entre 910 et 917 m d'altitude. Le site, d'origine naturelle, est une dépression naturelle salée, labile et fermée dont l'altitude est la plus élevée de la région de Sétif. Il s'enfonce dans un relief généralement plat où l'Oued El Melah, alimenté par les eaux usées (ménagère et industrielle) de la ville d'El Eulma et du village d'El Melah est permanent. C'est lui qui assure l'hydromorphie de la sebkha en saison estivale. En hiver et durant les années pluvieuses le niveau d'eau peut atteindre 1,5 m (Anonym, 1974).

La sebkha est entourée par une ceinture de végétation constituée principalement de plantes halophytes dont les principales sont : **Suaeda fruticosa**, *Atriplex halimus*, *Atriplex glauca*, *Salsola fruticosa*. Les plantes caractéristiques des zones salées sont ainsi présentes durant toute l'année. Sur les bords des régions occidentale, nous pouvons observer des touffes de joncs dominées par *Juncus maritimus* et dans les régions septentrionales, orientales et nord-orientales, nous pouvons observer la dominance de phragmites *Phragmites australis* et de typha *Typha angustifolia* avec une grande prairie à *Cyperus longus* des chlorophycées et *Cynodon dactylon*. Le plan d'eau est riche en *Lemna minor* au printemps, se développant sur toute la surface de l'eau indiquant ainsi une putréfaction de l'eau.

Concernant la faune, mis à part les dénombrements d'oiseaux d'eau hivernants réalisés par les services des forêts de la wilaya de Sétif aucun suivi scientifique n'a été fait sur la faune fréquentant la sebkha. Des inventaires sporadiques des communautés oiseaux d'eau ont eu lieu depuis 1971 (Anonyme, 1974).



**LES MICROORGANISMES
EXTREMOPHILES**

3. LES MICROORGANISME EXTREMOPHILES :

Dans la nature, les microorganismes de par leur spécificité, leurs propriétés uniques et leur grande diversité métabolique sont innombrables et abondent différents types d'habitats. Cela inclut des habitats tels que le sol, l'eau, l'air. En effet, la stérilité au sein d'un échantillon environnemental est extrêmement rare. Les caractéristiques abiotiques d'un milieu sont les premiers facteurs de sélection des espèces.

La croissance et la survie d'un microorganisme sont contrôlées par plusieurs facteurs physico-chimiques, biotiques et abiotiques. Cela signifie qu'un biotope, pour un microorganisme, est déterminé par une gamme pour chaque facteur permettant sa croissance (Kristjansson et Hreggvidsson, 1995). Il existe des extrémophiles qui prospèrent dans des biotopes combinant plusieurs conditions extrêmes, ils sont baptisés « poly extrémophiles ». Ce qualificatif englobe la résistance à des conditions physiques (par exemple la température, la pression, les radiations) et géochimiques (par exemple la dessiccation, la salinité, le pH) (Mesbah et al., 2009).

Depuis la découverte des microorganismes extrémophiles, les Archaea ont été les plus identifiées dans les environnements extrêmes, surtout associées à des sources thermales (Woese et al., 1987). À cette époque, beaucoup de scientifiques supposaient que celles-ci étaient d'ailleurs spécifiques à des écosystèmes hostiles. Les Archaea étaient même parfois considérées comme étant les seuls microorganismes pouvant survivre dans ce genre d'endroit. Cependant, de nombreuses études ont démontré qu'il existe, dans les autres domaines de la vie (*Bacteria* et *Eukarya*) des microorganismes qui sont également capables de survivre dans des environnements extrêmes (Weber et al., 2004). De plus, d'autres études ont démontré que les Archaea sont probablement présentes dans tous les écosystèmes de notre planète tels les lacs (Auguet et Casamayor, 2008) et les rivières des régions tempérées, les océans, le sol et même l'estomac des ruminants.

3.1. Biodiversité du monde vivant

En comparant les séquences de nucléotides de l'ARN ribosomal (ARNr 16S) de différents types de cellules, on constate qu'il existe trois groupes distincts de cellules : les Eucaryotes, les Bactéries et les Archaeobactéries (Woese, 1994).

En 1978, Carl Woese suggère de faire des trois types de cellules, des divisions taxonomiques supérieures aux règnes : les domaines. Il pense que les archaeobactéries (*Archaea*) et les bactéries (*Bacteria*), bien qu'apparemment semblables, devraient former deux domaines séparés dans l'arbre phylogénétique (figure 3.1).

Dans ce modèle largement accepté, le troisième domaine, celui des eucaryotes (*Eucarya*), est constitué par le règne des animaux (*Animalia*), le règne des plantes (*Plantae*), le règne des mycètes et le règne des protistes. La taxonomie utilise des outils pour mieux comprendre l'évolution des organismes et les relations qui les unissent. On découvre chaque jour de nouveaux organismes, et les taxonomistes tentent toujours d'élaborer un système naturel de classification qui reflète les relations phylogénétiques.

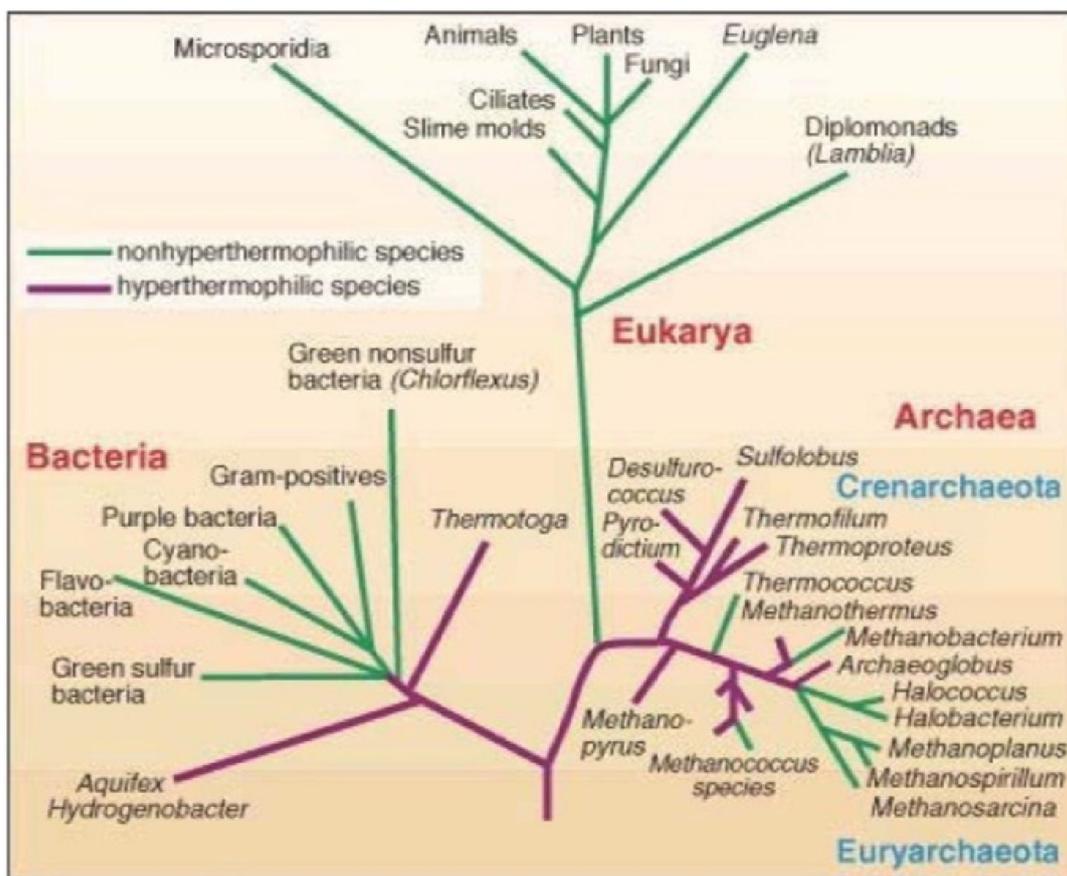


Figure 3.1 Arbre phylogénétique des êtres vivants (Woese, 1994)

3.2. Diversités des Archaea

Non seulement le groupe des archaea comprend des espèces très différentes des autres microorganismes, mais elles le sont aussi notablement entre elle. La variabilité chez les Archaea est probablement du même ordre de grandeur que celle trouvée chez les Bacteria bien qu'un plus petit nombre d'Archaea ait été identifié (Perry et al., 2004).

Le **tableau 3.1** représente les caractéristiques générales des organismes appartenant aux trois domaines des êtres vivants :

Tableau 3.1 : Comparaison entre Archaea, Bacteria et Eucarya (Perry et al., 2004)

	<i>Archaea</i>	<i>Bacteria</i>	<i>Eucarya</i>
Organismes typiques	<i>Archaea</i> produisant du méthane, halobactéries, thermophiles extrêmes	Entérobactéries, cyanobactéries, <i>Bacillus</i> , etc.	Champignons, plantes, animaux, algues, protistes
Taille typique	1 à 4 µm	1 à 4 µm	Supérieure à 5 µm
Caractéristiques physiologiques	Aérobie et anaérobie	Aérobie et anaérobie	Très largement aérobie
Matériel génétique	Petit chromosome circulaire, plasmides et virus ; génome associé avec des faux histones	Petit chromosome circulaire, plasmides et virus ; pas d'histones	Noyau complexe avec plus d'un chromosome linéaire, virus, génome associé avec des histones
Différenciation	Généralement unicellulaire, différenciation cellulaire rare	Généralement unicellulaire, différenciation cellulaire rare	Unicellulaire et pluricellulaire, différenciation cellulaire fréquente
Paroi cellulaire	Protéine, glycoprotéine, pseudomuréine, pas de paroi	Muréine et lipopolysaccharide, rarement formée de protéines, formes sans parois rares	Grande variété, absence de peptidoglycane
Membrane cytoplasmique	Ether du glycérol et d'isoprénoïdes	Ester du glycérol et des acides gras	Ester du glycérol et des acides gras, cholestérol fréquent
Synthèse protéique	Ribosome 70S, insensible au chloramphénicol et au cycloheximide	Ribosome 70S, insensible au chloramphénicol et au cycloheximide	Ribosome 80 et 70S, insensible au chloramphénicol, sensible au cycloheximide
ARN polymérases	Complexe	Simple	Complexe

3.3. Les diversités métaboliques des extrémophiles

Le terme « extrémophiles » a été inventé pour la première fois, en 1974, par MacELROY, dans un journal intitulé ‘Some comments on the evolution of extremophiles’, il a été interprété par plusieurs façons pour enfin être associé aux microorganismes qui peuplent des niches écologiques extrêmes caractérisées par des conditions défavorables pour le développement d’une vie (Irwin et Baird, 2004).

La notion d'extrémophilie est différente de celle de la résistance aux conditions extrêmes, elle implique que les cellules se développent et fonctionnent de manière optimale dans ces conditions (Alber et al., 2001).

Les microorganismes extrémophiles peuvent être répertoriés en plusieurs groupes, selon leurs paramètres de croissance et les conditions dans lesquelles ils existent (hautes et basses températures, valeurs extrêmes de pH, hautes concentrations de sel, hautes pressions et radiations).

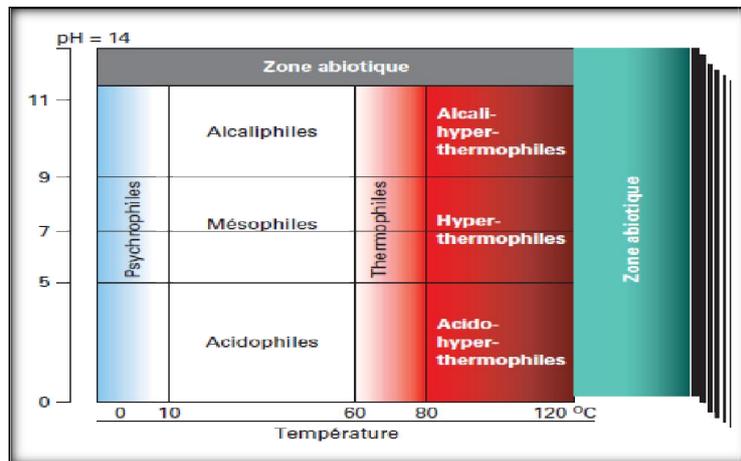


Figure 3.2 : Terminologie des extrémophiles en fonction de la température et du pH (Alber et al., 2001)

3.4. Les caractéristiques cellulaires des archées :

3.4.1. Le métabolisme :

En fonction de leur respiration (aérobie ou anaérobie), les différents groupes d'archées possèdent des gènes qui leur sont propres. Pour exemple, les gènes de biosynthèse de l'hème (composé retrouvé dans de nombreuses protéines oxydo-reductrices) ne sont pas retrouvés chez les archées du genre *Pyrococcus* mais retrouvés dans les génomes de Sulfolobales et de méthanogènes (Brochier-Armanet et al., 2009).

Certains systèmes de translocation membranaire sont associés à la production d'un gradient d'ions qui permet de fournir de l'énergie aux processus métaboliques.

Le catabolisme de composés carbohydrates (sucres) et de peptides produit de l'énergie sous forme d'ATP. Les enzymes participant aux différentes voies de glucogénèse sont différentes en fonction des sous-groupes d'archées ainsi qu'en fonction de leur capacité à dégrader les variétés de sucres.

Bien que peu conservées chez les archées, des protéines de type ubiquitine-like (impliquées dans le ciblage de protéines au protéasome) seraient aussi retrouvées chez *H. volcanii* (Humbard et al., 2010a). Les archées sont aussi dotées de lipases, tel est le cas de *T. sibiricus* où des lipases putatives sont retrouvées permettant d'hydrolyser des substrats tryacyglycérides (donnant des molécules de glycérol et des chaînes d'acides gras, le glycérol serait utilisé comme substrat énergétique).

Les voies de biosynthèse d'acides aminés sont en fonction de l'auxotrophie des différentes archées. Ces voies de biosynthèse impliquent différents ensembles de protéines selon les cellules.

3.4.2. Parois et membranes cellulaires :

Les parois d'archées sont dépourvues de peptidoglycane justifiant la résistance à l'attaque du lysozyme. Au niveau de leur membrane plasmique, la caractéristique remarquable est due à la nature de leurs lipides : les phospholipides bactériens/eucaryotes sont composés à la fois de molécules de glycérol liées par des liaisons esters à des acides gras linéaires de 16 à 18 atomes de carbone (partie hydrophobique) alors que chez les archées, les parties hydrophobes sont composées de chaînes de molécules d'isoprène liées aux molécules de glycérol par des liaisons éthers (Matsumi et al., 2010). Par ailleurs, la composition lipidique de la membrane est variable d'une archée à une autre mais varie aussi en fonction des conditions environnementales (Matsumi et al., 2010).

3.4.3. Les éléments génétiques :

3.4.3.1. Les éléments transposables :

Les archées possèdent un grand nombre et une grande variété d'éléments transposables : des séquences d'insertions (IS pour insertion séquence) et des éléments transposables miniatures répétés et inversés (MITE pour miniature inverted-repeat transposable elements) (Filee et al., 2007). Chez les archées, les IS sont généralement de courts segments d'ADN spécifiques (jusqu'à ~2 kb) contenant une (IS partiels) à deux ORF (qui codent la transposase responsable de la mobilité de l'IS).

Les premiers événements de transposition ont été mis en évidence chez des halophiles extrêmes (*H. salinarum* et *H. volcanii*) possédant un grand nombre d'IS suggérant que les éléments transposables joueraient un rôle primordial dans le réarrangement de gènes dans les

génomés d'halophiles. Le modèle le plus intrigant correspond au génome de *S. solfataricus* pour lequel 443 IS sont identifiées (dont 297 sont partiels, source : IS Finder <http://www-is.biotoul.fr/>). Ces IS seraient impliquées notamment dans des événements de délétion, des réarrangements chromosomiques et des inactivations de gènes par insertion (voir références citées dans (Filee et al., 2007)).

3.4.3.2. Les plasmides :

Les archées possèdent des plasmides sous forme « cryptique » (portant un gène unique) ou sous forme de méga-plasmides (réplicons secondaires en plus du chromosome)

3.5. Types métaboliques

3.5.1 Halophilie extrême et adaptation :

Les microorganismes vivants dans les environnements salins ou hypersalins, tels que le grand lac salé de l'Ouest américain et la Mer Morte, sont divisés en :

- ❖ Ceux qui sont capables de se développer sans sel tout en tolérant des concentrations élevées en sel, ce sont les microorganismes halotolérants (Echigo et al., 2005) par exemple l'espèce *Halobacillus salinus* qui a été isolée à partir d'un lac salé en Corée, cette espèce se développe sans sel et dans des milieux contenant plus de 23% de NaCl.
- ❖ Ceux qui ne se développent qu'en présence de sel, ce sont les microorganismes halophiles.

Les microorganismes nécessitant moins de 2% (p/v) de sel pour une croissance optimale ne sont pas considérés comme halophiles (Ollivier et al., 1994).

La propriété des microorganismes halotolérants à s'adapter rapidement aux changements des concentrations externes de sel, les rend meilleurs candidats pour la bio-prospection que leurs homologues halophiles qui dépendent strictement de la présence de sel (Shivanand et Jayaraman, 2009).

Selon, dans le groupe de microorganismes halotolérants, il existe plusieurs catégories Les microorganismes légèrement halotolérants qui tolèrent des concentrations de NaCl de 6 à 8% (p/v).

- ✓ Les halotolérants modérés qui tolèrent des concentrations de NaCl jusqu'à 18 à 20% (p/v).
- ✓ Les halotolérants extrêmes qui tolèrent toutes concentrations de NaCl varient de 0% jusqu' au point de saturation.

Concernant les halophiles, de nombreuses définitions ont été données par différents auteurs, en fonction de leur nécessité en sel (NaCl) pour une croissance optimale.

Parmi ces définitions, celles qui identifient que les microorganismes qui se développent à des concentrations de 2 - 5% de NaCl (0.2 - 0.85M), sont légèrement halophiles, et ceux qui se développent à 5 - 20% de NaCl (0.85- 3.4M), sont des halophiles modérés, comme exemple l'espèce *Bacillus persepolensis*, alors que, les halophiles qui se développent à des concentrations de 20 - 30% de NaCl (3.4 – 5.1M) sont des halophiles extrêmes (Ollivier et al., 1994).

D'autres définitions admettent que:

- **Les microorganismes halophiles modérés** sont ceux qui se développent d'une manière optimale à des concentrations de 3 - 15% de NaCl (0.5 - 2.5M) (Echigo, et al., 2005), comme exemples d'espèces halophiles modérées appartenant au genre *Bacillus* : *Bacillus salarius* (Lim et al., 2006b).
- **Les microorganismes halophiles extrêmes** requièrent des concentrations élevées en NaCl, avec un optimum de croissance entre 15 et 30 % (2.5 - 5.2 M) (Echigo et al., 2005).

Comme exemple l'espèce *Bacillus haloalkaliphilus* qui a été isolée à partir du lac Gabara en Égypte, elle se développe à des concentrations supérieures à 4M de NaCl avec un optimum de croissance à 3M (Weisser et Trüper, 1985).

Il est difficile d'établir des limites qui définissent l'halophilisme et l'halotolérance car de nombreux facteurs comme la température, la concentration et la présence et la nature de nutriments disponibles aussi la présence des autres sels modifient considérablement la réponse des microorganismes au NaCl. Comme exemple, pour l'espèce *Halomonas halophila*, la concentration saline optimale est de 5 % (p/v) à 22°C alors qu'elle est de 7.5 % (p/v) lorsque la température varie de 32 à 42°C (Quesada et al., 1987).

3.5.2. Thermophilie extrêmes et adaptation :

Certains extrémophiles existent dans des écosystèmes où la température atteint des valeurs maximales tels que les fumeurs noirs et les sources hydrothermales (Irwin et Baird, 2004), ou des valeurs minimales comme les mers froides polaires, les glaciers alpins et les sédiments océaniques (Cavicchioli et al., 2002).

Ces extrémophiles sont classés en :

- ❖ Thermophiles : qui se développent d'une manière optimale aux alentours de 60°C (Nakagawa et al., 2004).
- ❖ Hyperthermophiles : Ce sont des thermophiles extrêmes qui présentent des optimums de croissance à des températures comprises entre 80 et 110°C.

Les hyperthermophiles les plus extrêmes sont des Archaea, ils appartiennent aux genres des *Pyrobaculum*, *Pyrodictium*, *Pyrococcus* et *Methanopyrus*, comme exemple, l'Archaea *Pyrococcus abyssi* ou « la boule de feu des abysses » qui a été collectée au niveau d'une cheminée de source hydrothermale à 2000 m de profondeur, au Nord du bassin Fidjien, dans l'Océan Pacifique, son optimum de croissance est à 96°C. Pour les bactéries, *Thermotoga maritima* et *Aquifex pyrophilus* croissent à des températures de 90°C et 95°C respectivement (Niehaus et al., 1999).

Les microorganismes hyperthermophiles peuvent être des anaérobies, des aérobies chimiolitho-autotrophes ou hétérotrophes, les derniers sont capables d'utiliser des polymères comme l'amidon, l'hémicellulose, les protéines, et les peptides (Niehaus et al., 1999).

- ❖ Psychrophiles : se développent de façon optimale à des températures inférieures ou égales à 15 °C avec un maximum de croissance à 20°C, et sont incapables de croître au-dessus de 20 ° C (Irwin et Baird, 2004).
- ❖ Les habitats des microorganismes psychrophiles comprennent les régions polaires où la lumière disparaît tout près de trois mois par année, où les ressources nutritives ne sont présentes qu'en faible quantité et où la température descend parfois à des niveaux incroyablement bas, et les eaux glacières (Vincent et al., 2004) qui ne sont pas seulement caractérisées par des basses températures, mais aussi par une pression élevée.
- ❖ Comme exemples de microorganismes psychrophiles, les genres *Psychrobacter* sp., *Arthrobacter* sp. et certaines espèces des genres *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Halomonas*, *Methanogenium*, *Micrococcus*, *Sphingomonas*, *Hyphomonas*, *Polaribacter*, *Psychroserpens*, *Polaromonas* et *Vibrio* (Satyanarayana et al., 2005).

La majorité des microorganismes psychrophiles sont des bactéries et des archées, mais des études récentes ont mis en évidence un nouveau groupe de champignons psychrophiles vivant en absence d'oxygène sous des champs de neige alpins (Chaturvedi et al., 2010).

- ❖ Psychrotrophes : sont capables de se développer à des températures inférieures ou égales à 15°C, mais, leur croissance optimale est atteinte à des températures égales ou supérieures à 18°C (Irwin et Baird, 2004).

3.5.3 Alcalophilie et acidophilie extrême et adaptation:

Les microorganismes, qui ne tolèrent pas seulement des pH extrêmes, mais exigent ces conditions pour avoir un métabolisme actif sont qualifiés acidophiles et alcalophiles.

3.5.3.1. Microorganismes acidophiles et adaptation :

Les microorganismes acidophiles se développent de façon optimale à un pH égal à 2 (Morozkina et al., 2010), ils colonisent des environnements acides alors que les acidotolérants peuvent être isolés à partir des environnements à pH neutre (Horikoshi, 1999).

Les acidophiles existent dans les trois domaines de la vie, certains acidophiles possèdent des mécanismes qui leur permettent de faire ressortir les protons intracellulaires pour garder le pH de leur cytoplasme proche de la neutralité donc leur protéines intracellulaires ne nécessitent pas de développer des mécanismes pour le maintien de leur stabilité alors que d'autres acidophiles, tel que *Acetobacter aceti*, ont un cytoplasme acide et possèdent des mécanismes qui expulsent les protéines intracellulaires à l'extérieur pour atteindre leur stabilité (Menzel et Gottschalk, 1985).

3.5.3.2. Alcalophilie extrêmes et adaptation :

Les microorganismes alcalophiles sont ceux qui se développent à des valeurs de pH égales ou supérieures à 9 avec un optimum entre 10 et 12, tout en montrant une croissance très faible près de la neutralité. Ces microorganismes ne se trouvent pas seulement dans des habitats à pH neutre ou alcalin, mais ils peuvent exister aussi dans des habitats acides (Horikoshi, 1999). Les microorganismes alcalophiles peuvent exister également dans des habitats qui combinent plusieurs facteurs physico-chimiques, ainsi on peut trouver des thermo-alcalophiles qui se développent de manière optimale à pH alcalins et à des températures supérieures à 50°C, comme il peut exister des halo-alcalophiles qui nécessitent des concentrations salines élevées et des pH alcalins (Sarethy et al., 2011).

Généralement, la réponse des microorganismes, en particulier les alcalotolérants, à des pH alcalins nécessite la présence intracellulaire des ions de sodium pour la régulation et le métabolisme.

Les lacs de soude, comme exemple le Lake Magadi au Kenya, représentent les milieux alcalins et salins les plus stables et productifs, avec des valeurs de pH généralement supérieures à 10 et atteignant parfois 12 (Jones et al., 1998). Ils sont caractérisés par une grande quantité de carbonate de sodium (Na_2CO_3) formé par concentration des évaporites (Grant et Tindall, 1980). Les microorganismes présents dans ces milieux salins et alcalins jouent un rôle important dans la reminéralisation de la matière organique au sein de l'écosystème. Ils sont les principaux contributeurs à la transformation du carbone organique, du soufre, des composés azotés et les métaux, ils ont aussi un rôle important dans les réseaux trophiques et les cycles des éléments nutritifs.

3.5.4. Barophilie et adaptation :

Zobell et Morita (1957) ont été parmi les premiers à tenter d'isoler les micro-organismes adaptés à croître sous des pressions élevées, et ils les ont appelé des barophiles.

Les premières bactéries barophiles ont été isolées en 1979, elles sont définies comme celles ayant une croissance optimale à des pressions supérieures à 40 MPa (mégapascal), alors que les bactéries barotolérantes présentent une croissance optimale à une pression inférieure à 40 MPa et poussent bien à la pression atmosphérique.

Le terme piézophile (en Grec piezo = pression et philo = aimer) a été introduit officiellement en 1995 pour décrire les microorganismes barophiles en comparaison avec d'autres termes similaires utilisés pour décrire l'effet de la pression dans d'autres domaines tel que la piézoélectrique (Yayanos, 1995).

Ils existent des espèces piézophiles qui supportent des pressions allant jusqu'à 130 MPa, de tels microorganismes sont trouvés dans les grands fonds marins à des profondeurs de 10 500 m sous l'océan (Irwin et Baird, 2004). Parmi les genres représentants des piézophiles, on trouve : *Shewanella*, *Colwellia*, *Moritella*, *Methanococcus*, *Pyrococcus* et *Thermus* (Abe et Horikoshi, 2001).

D'autres microorganismes se développent aussi dans d'autres environnements extrêmes comme les solfatares (milieux riches en soufre), les couches pétrolifères, les aires de décomposition organique où on rencontrent les méthanogènes, etc. (Dudeja et al., 2010). Il y a aussi des microorganismes extrémophiles capables de vivre en présence de fortes concentrations d'ions métalliques (métallophiles), à des niveaux élevés de rayonnement (radiophiles), ou en absence d'oxygène (anaérobies strictes).

3.5.5. Polyextremophilie:

Certains microorganismes abritent des écosystèmes qui combinent plusieurs conditions extrêmes, ces microorganismes sont appelés poly extrêmophiles, telle que l'espèce archéenne *Sulfolobus acidocaldarius* qui se développe à 80°C et à un pH égal à 3 (Satyanarayana et al., 2005).

Les communautés microbiennes des mers glacières de l'arctique et l'antarctique sont exposées à différentes concentrations de sel plus élevées que celles des eaux de mer, ces microorganismes sont des halo-psychrophiles (Vincent et al., 2004). *Bacillus infernus* "le bacille de l'enfer", a été isolé à partir des profondeurs d'environ 2700 m en dessous de la surface de la terre, ce microorganisme extrêmophile est baptisé thermophile (60 ° C), halotolérant (concentrations de sel 0,6 M) et légèrement alcalophiles (pH 7,8).

Un autre exemple de bactéries poly extrêmophiles est l'espèce *Natranaerobius thermophilus* qui est une bactérie halophile alcalo-thermophile, elle a été isolée à partir d'un sédiment d'un lac alcalin et hypersalin de Wadi An Natrun en Egypt. Cette espèce se développe à une température entre 35°C et 56°C avec un optimum à 53°C. La gamme de pH permettant sa croissance est entre 8.3 et 10.6 avec un optimum à pH égal à 9.5. Un pH égal ou inférieur à 8.2 et égal ou supérieur à 10.8 ne permet pas du tout la croissance de cette espèce.

A l'optimum de la température et du pH *N. thermophilus* se développe à une série de concentration saline comprise entre 3.1- 4.9 M avec un optimum entre 3.3 et 3.9 M (Mesbah et al., 2007).

Le tableau 3.2 récapitule les différents groupes de microorganismes extrêmophiles et les paramètres environnementaux correspondants.

Tableau 3.2: Conditions extrêmes et microorganismes appropriés. (Echigo et al, 2005 ; Olivier et al, 1994, Irwin et Baird, 2004)

Paramètres environnementaux et types de microorganismes	Description des microorganismes
La salinité	
Halotolérants	Croissance sans sel avec tolérance à des concentrations élevées
Légèrement halotolérants Halotolérants modérés Halotolérants extrêmes	Tolérance de 6 à 8% (p/v) de NaCl Tolérance de 18 à 20% (p/v) Tolérance de 0% jusqu'à la saturation
Halophiles	Nécessitent le sel pour la croissance
Légèrement halophiles Halophiles modérés Halophiles extrêmes	2-5% NaCl (0,2-0,85M) 5-20% NaCl (0,85-3,4M) 3-15% NaCl (0,5-2,5M) 20-30% NaCl (3,4-5,1M) 15 et 30% NaCl (2,5-5,1M) ≥10% NaCl(1,7M)
Les non halophiles	Nécessite moins de 2% de NaCl (p/v)
Hyperthermophiles Psychrophiles Psychrotrophes	Optimum entre 80 et 110°C Optimum ≤15°C et un max à 20°C. Pas de croissance ≥20°C Croissance à ≤15°C. Optimum à ≥18°C
Ph	
Les acidophiles Les alcalophiles	Optimum à pH égale à 2 Optimum à pH égale à 9 avec un optimum entre 10 et 12
La pression	
Piezophiles	Supportent des pressions ≥40MPa



**APPLICATION DES
MICROORGANISMES
DANS
L'ENVIRONNEMENT**

4. APPLICATION DES MICRORGANISMES EXTREMOPHILES DANS L'ENVIRONNEMENT :

Ces dernières années les études portant sur les Archaeas et les Bacteries ; ont amené les chercheurs à s'intéresser aux propriétés de microorganismes pouvant se développer dans des conditions extrêmes de pH, de température et de salinité. Outre l'aspect fondamental présenté par ces microorganismes, le désir d'améliorer la connaissance de l'évolution dans les conditions extrêmes ainsi que la recherche de potentialités biotechnologiques. Ces microorganismes sont exploités soit pour leur capacité à produire des métabolites (polymères et autre) et des enzymes intéressants en biocatalyse (hydrolase) soit pour leur pouvoir à dégrader des composés difficilement métabolisables par la majorité des microorganismes « normaux ». Leur action peut se faire :

- ✓ Sur des effluents riches en matière organique.
- ✓ Sur des déchets minéraux riche en fer et/ou en soufre.
- ✓ Sur des gisements miniers.

4.1. Enzymes :

La biocatalyse industrielle a trouvé dans les microorganismes halophiles une source d'enzymes ayant de nouvelles propriétés. Au fil des années, différentes enzymes produites par des microorganismes halophiles et halotolérants isolés des sols salés, ont été décrites et un certain nombre de nouvelles possibilités pour les procédés industriels. (Ventosa et al 1998)

Les enzymes halophiles qui sont généralement de type hydrolase sont actives et stables à des concentrations de sel élevées et plusieurs d'entre elles sont thermo -tolérantes et alcalophile et sont dites polyextremophiles (Moreno et al 2009). Ces propriétés rendraient des enzymes halophiles attrayantes pour différentes applications biotechnologique puis que elles seraient capable de catalyser des réactions dans des conditions difficiles spécifique à de nombreux processus industriel. Les enzymes les plus recherchées sont :

- **Les amylases** ce sont des enzymes qui hydrolysent les molécules en dextrans et progressivement en petits polymères composés d'unités de glucose. Ces enzymes constituent une classe d'enzymes industrielles, qui à, elle seule forme 25% des enzymes du marché couvrant plusieurs processus industriels tels que les industries du sucre ; de textile, de papier et de produits pharmaceutiques.
- **Les protéases** microbiennes sont intensivement étudiées et largement appliquées dans les processus industriels. Elles sont généralement employées comme additifs de

détergents, dans la transformation des produits alimentaires, dans l'industrie pharmaceutique, du cuir et dans la transformation des déchets (Moreno et al 2009).

- **Les lipases** sont un groupe d'enzymes d'importance biotechnologique. Elles ont beaucoup d'application dans les industries alimentaires, pharmaceutiques et dans la fabrication de détergents. Quelques genres bactériens lipase-producteurs importants incluent *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Salinivibrio* et *Staphylococcus* (Moreno et al 2009).

- **Les cellulases** sont principalement appliquées dans l'industrie textile (Aygan et Arikan, 2008). L'intérêt porté aux cellulases augmente également avec la production du bioéthanol. Ces enzymes sont employées pour hydrolyser les matériaux cellulosiques préalablement traités en vue d'obtenir des sucres fermentescibles. Habituellement, les Cellulases halophiles et halotolérantes dérivent des *Bacillus sp* (Aygan et Arikan, 2008), et de *Salinivibrio sp*. Ces enzymes ont été rapportées comme étant thermostables, halostables et alcalostables et idéales pour de nombreuses applications industrielles (Moreno et al 2009).

4.2. Biodégradation des résidus :

L'application des halophiles à la biodégradation des composés aromatiques comme le phénol, les hydrocarbures aromatiques polycycliques est très répandue. Ainsi, *Halomonas halodurans* est capable de dégrader le phénol et de cliver les composés aromatiques complexes, tels que *le benzoate* (Margesin & Schinner, 2001). D'autres espèces archéennes appartenant aux genres *Halobacterium*, *Haloarcula* et *Haloferax* dégradent des n-alcane et des insecticides. Ces capacités les rendent aptes à jouer un rôle dans la décontamination des environnements salins contaminés par les hydrocarbures. L'application des halophiles au traitement des effluents industriels hypersalins générés par les industries chimiques, du cuir, etc. apparaît aussi comme une évidence (Ventosa et al., 2008).

Les procédés industriels comme la production de pesticides, d'herbicides et produits pharmaceutiques, en plus des usines de papier et les industries pétrochimiques génèrent des effluents contenant des composés toxiques à différent niveaux de salinité.

Selon la réglementation de l'environnement par conséquent des traitements physico-chimiques et biologiques s'imposent pour contrecarrer ce phénomène. Dans le traitement

biologique, les micro-organismes communément utilisés montrent une faible efficacité à cause de la dégradation en conditions salines.

Ainsi, l'utilisation de bactéries halophiles pour la dégradation des composés aromatiques en conditions salines a permis de mettre en avant leur fort potentiel dans des procédés de bioremédiation. Plusieurs études ont révélé la capacité des halophiles modérées à dégrader différents composés organiques, tels que : l'acide benzoïque, l'acide p-hydroxybenzoïque, l'acide cinnamique, l'acide phénylacétique, l'acide Phenylpropionique, le phénol, l'acide p-coumarique, l'acide férulique et l'acide p-aminosalicylique (Garcia et al, 2004).

En outre, les sols contaminés avec des alcanes linéaires et ramifiés (C20-C40), des hydrocarbures aromatiques (phénol, toluène, pyrène, phenanthrène, anthracène) insolubles à basses températures, peuvent être décontaminés avec les microorganismes thermophiles (Antranikian, 2008).

La manipulation et la réutilisation des pneus épuisés posent de sérieux problèmes et le recyclage des matériaux en caoutchouc est préférable d'un point de vue économique et Environnemental. L'espèce *Pyrobaculum furiosum* est capable de désulfurer le caoutchouc en donnant un produit avec de bonnes propriétés mécaniques.

4. 3. Traitement des minerais :

Dans les traitements industriels de minéraux, des microorganismes thermophiles oxydant le soufre et le fer sont employés pour libérer l'or inclus dans les minéraux sulfurés et dans la concentration des métaux lorsque les procédés chimiques conventionnels ne sont pas rentables. Parmi les archées réductrices de fer, *Pyrobaculum islandicum* et *Pyrobaculum furiosum*, ont la capacité de transformer le chlorure d'or en or insoluble .

Alors que les acidothermophiles comme *Sulfolobus metallicus* et *Metallosphaera sedula* sont utilisées dans l'extraction du cuivre à partir de minéraux sulfureux ou encore dans le traitement de certains minerais sulfurés tels que la pyrite.

La lixiviation microbienne ou biolixiviation est utilisée essentiellement pour concentrer les métaux (cuivre, or et uranium) lorsque les concentrations initiales du minerai sont faibles et que les procédés chimiques conventionnels ne sont pas rentables. Pour l'extraction du cuivre, le procédé de lixiviation fait tout d'abord appel à un arrosage du minerai par une solution acide contenant du fer ferrique (Fe^{3+}) produit à partir de fer ferreux (Fe^{2+}) par les bactéries de l'espèce *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Cette opération solubilise le cuivre. L'étape

suivante vise à précipiter le cuivre par des copeaux de fer (Fe) et une production de fer ferreux. Le rôle des bactéries dans ce procédé consiste à oxyder Fe^{2+} en Fe^{3+} . Toutefois, l'oxydation biologique des composés sulfurés inorganiques réduits est importante pour limiter leur contribution à la création d'un film de passivation à la surface des métaux qui réduirait les rendements d'extraction. Cette passivation est éliminée lorsque la biolixiviation est effectuée à haute température avec des espèces thermo-acidophiles. Les opérations peuvent se dérouler en milieu ouvert, et dans ce cas le processus ne fait pas appel à une seule espèce mais à des consortiums dominés par des espèces microbiennes acidophiles. En milieu ouvert, il n'est pas possible de faire appel à des thermophiles. Par contre, lorsque l'extraction s'effectue en réacteurs, les conditions sont mieux contrôlées, plus homogènes et il s'établit un consortium microbien dominé par deux ou trois espèces qui, pour le traitement de certains minerais comme la pyrite ou la chalcopirite, peut faire appel uniquement à des archées thermophiles

D'autre part les recherches menées sur l'implication du compartiment biotique dans la spéciation et la séquestration de l'uranium dans les sols ont démontré que certaines bactéries ont la capacité de réduire cet élément en anaérobiose. Historiquement, la réduction de l'U(VI) fut mise en évidence avec la souche *Veillonella alcalescens* (Woolfolk et Whiteley 1962) puis plus tard sur *Geobacter metallireducens* et *Shewanella putrefaciens* (Lovley et al.,1991). Depuis, des études ont démontré que d'autres espèces bactériennes appartenant à la famille des DMRB(Dissimilatory Metal-Reducing Bacteria), des ferri-réductrices, des sulfato-réductrices, des dénitrifiantes ou encore des Archaea peuvent réduire l'U(VI) (Wallet Krumholz 2006). Pour certaines de ces espèces bactériennes, comme *G. metallireducens* ou *S. oneidensis*, la réduction de l'U(VI) va entraîner généralement la formation d'uraninite (UO_2), minéral d'U(IV) insoluble, ce qui a pour effet d'immobiliser l'uranium dans les sols de manière durable.).

4.4. Alternative aux pesticides

L'utilisation de certains microorganismes non pathogènes en tant que biopesticides est une technologie émergente, écologiquement compatible et considérée comme une alternative prometteuse aux pesticides chimiques (de synthèse)

La lutte biologique par l'utilisation des microorganismes pour combattre les maladies dues aux organismes phytopathogènes offre une alternative intéressante aux produits chimiques causant la pollution des sols ayant des effets néfastes sur la santé.

Ainsi, l'efficacité des bactéries halophiles modérées isolées des sols salins sur l'inhibition de plusieurs champignons comme *Fusarium sambucinum* et *Botrytis cinerea*. a été rapportée.

Ces bactéries halophiles ont été assignées aux genres *Bacillus*, *Halomonas*, *planococcus*, *Salinicoccus* et *Halovibrio* (Zhao et al, 2003). De là ces microorganismes halophiles ont été considérés comme étant de bons candidats pour lutter contre l'activité des champignons phytopathogènes.

4.5. Production des polymères :

Les halobactéries produisent des exopolysaccharides (EPS) qui ont d'excellentes propriétés rhéologiques et résistent à des températures très élevées, des salinités et pH extrêmes. Ces métabolites sont utilisés en tant qu'agents émulsifiants et surfactants et ont une large application dans les industries alimentaires et pharmaceutiques :

- ❖ Production des liposomes, utilisés en médecine et cosmétique pour le transport des métabolites aux sites spécifiques des cellules (Margesin et Schinner, 2001). Les liposomes des bactéries halophiles sont utilisés en médecine et en cosmétique pour transporter les recomposés jusqu'à leur site spécifique. Les liposomes archéens dérivant des lipides à liaison éther ont une stabilité chimique et une résistance aux estérases et aux phospholipases meilleures que ceux dérivant des acides gras .
- ❖ Production de plastique biodégradable pouvant remplacer le dérivé d'huile thermoplastique, dérivant du pétrole, dans plusieurs domaines (Margesin et Schinner, 2001).
- ❖ Les biosurfactants : les microorganismes halophiles et halotolérants produisent les biosurfactants qui peuvent jouer un rôle significatif dans la remédiation accélérée des environnements salins, pollués par le pétrole (Margesin et Schinner, 2001).
- ❖ La production massive de polyesters (polyhydroxyalcanoates) à partir de l'amidon par les archaea du genre *Haloferax* pourrait servir de plastiques biodégradables. Les poly (beta-hydroxy butyrate) (PHB), une réserve de carbone formée par certaines bactéries (Lillo & Rodriguez-Valera, 1990) ont attiré l'attention en tant que polyesters thermoplastiques biodégradables, résistants à l'eau, tolérés et dégradés par les tissus de l'Homme et des animaux. Cette dernière propriété a rendu possible leur utilisation en tant que biomatériaux dans le domaine médical comme fils de suture ou fixation biorésorbables.

4.6. Applications basées sur les cellules entières :

Il s'agit d'applications pour lesquelles l'utilisation de biomolécules purifiées à partir des cultures est non rentable ou d'applications qui requièrent l'action directe d'une population microbienne, voire d'un mélange complexe de différentes espèces. Parmi les applications des thermophiles :

4.6.1. Production d'hydrogène :

Il y a un intérêt croissant pour l'utilisation des sources renouvelables afin de satisfaire les besoins énergétiques mondiales de plus en plus conséquentes. Les produits de la fermentation anaérobie incluent l'éthanol, le méthane et l'hydrogène. La recherche sur la production biologique d'hydrogène est devenue attrayante pour des utilisations possibles du biohydrogène comme source d'énergie propre. La voie de production du biohydrogène dépend de l'approvisionnement en substrats organiques et pourrait idéalement être adaptée à une production d'énergie accouplée avec un traitement des déchets organiques (Antranikian, 2008). Des hydrogénases archéennes ont été la cible de recherche intensive. Une NiFehydrogénase cytoplasmique issue de l'hyperthermophile *Thermococcus kodakaraensis* est active de façon optimale à 90°C pour la production d'hydrogène avec le méthylviologène comme substrat. La même enzyme membranaire est identifiée chez la bactérie *Thermotoga tengcongensis* (Soboh et al., 2002) et autres membres de l'ordre des Thermotogales.

4.6.2. Production de solutés compatibles :

La production de solutés compatibles (sucres, bétaïnes, éctoïnes) par les bactéries halophiles modérées et halotolérantes peut être utilisée pour la stabilisation des enzymes, de l'ADN et des membranes. Aussi des applications sont à répertorier en fermentations et en agriculture). Des gènes codant pour la synthèse de l'éctoïne ont été greffés dans des cultures de cellules de plantes de tabac avec succès. Les plantes transgéniques sont devenues plus tolérantes au choc hyperosmotique.

L'utilisation du système photobiologique bactériorhodopsine (br), exceptionnellement stable, est envisagée pour fabriquer un système de vision intégré aux nouvelles générations d'ordinateurs et de robots. La br peut aussi être utilisée comme matériel photosensible en optique. De même, les vésicules formées en présence de détergents à partir de *Halobacterium salinarum* peuvent servir dans la conversion de l'énergie lumineuse (Margesin & Schinner, 2001).



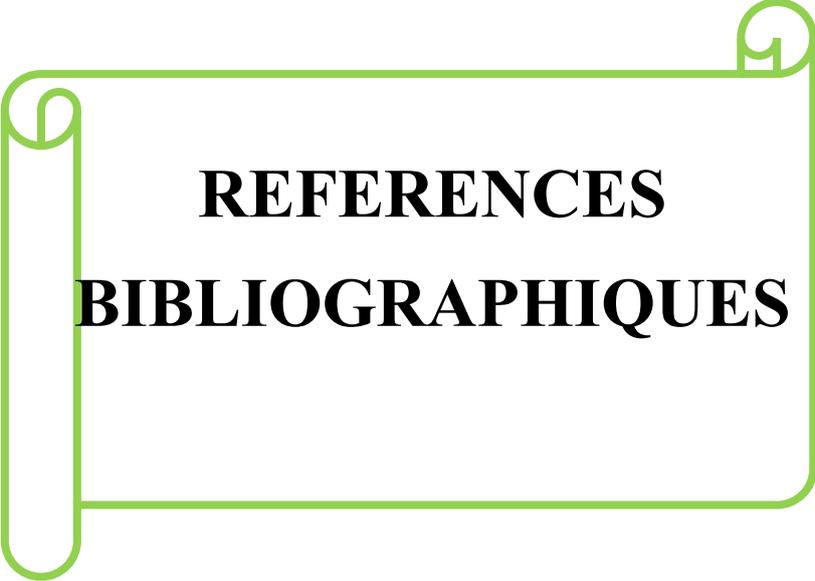
CONCLUSION

5. CONCLUSION :

En dehors des conditions physico-chimiques normales la vie existe. Les organismes qui se développent dans ces biotopes hostiles sont globalement qualifiés d'extrêmophiles. Ils ont dû s'adapter à des valeurs extrêmes d'un ou de plusieurs paramètres physico-chimiques. On peut citer par exemple la température pour les hyperthermophiles qui croissent de manière optimale au-dessus de 80 °C, près des geysers ou près des cheminées volcaniques. A l'inverse, les psychrophiles préfèrent des températures inférieures à 15 °C. Les autres paramètres physico-chimiques sont le pH, l'absence d'eau, les radiations ou un environnement chimique particulier (forte concentration en métaux, atmosphère de CO₂, etc.). Mais parmi les domaines les plus étudiés de l'extrêmophilie se trouvent les hautes températures (thermophilie) ainsi que les fortes salinités (halophilie).

Les organismes vivant en milieux extrêmes et en particulier, les microorganismes présentent un répertoire de voies métaboliques et de biomolécules originales leur permettant non seulement de survivre dans ces conditions, mais aussi de se développer souvent de manière optimale. L'intérêt porté à ces microorganismes a abouti à la découverte d'une diversité inouïe, complètement inattendue, dans des milieux supposés hostiles à la vie. Egalement, les propriétés singulières de leurs biomolécules à savoir les enzymes ont très vite attiré l'attention des biotechnologues.

Alors, parallèlement à leurs biodiversités, l'étude de ces bactéries extrêmophiles a mené à les considérer comme des bactéries à fort potentiel biotechnologique par leurs production d'enzymes extracellulaire, des solutés compatibles, dépollution et traitement des effluent organique et minérale, la production des polymères à grand intérêt dans différentes industries. Aussi certain bactéries extrêmophiles sont utilisées dans les procédés de bioremédiation et comme moyens de lutte biologique contre certain microorganismes pathogènes.



REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abe F. and Horikoshi K. The biotechnological potential of piezophiles. *Trends in Biotechnology*, 19: 102-108 (2001).
- Alber S., Vossenbergh J., Driessen A. and Konings W., Bioenergetics and solute uptake under extreme conditions, *Extremophiles*, 5: 285-294(2001).
- Anonym, Projet d'études devant permettre la définition de programmes de développement sur la zone de rénovation rurale des hautes plaines sétifiennes. O.T.I., Ressources naturelles, pédologie, 219p. Carte de classification pédologique au 1/50 000, feuille n° 118 (1974).
- Antranikian G Industrial relevance of thermophiles and their enzymes in: *Thermophiles, biology and technology at high temperatures*. Ed. Robb F., Antranikian G., Grogan D., Driessen A, 8:114-147(2008)..
- Aygan A and Arikan B. A new halo-alkaliphilic, thermostable endoglucanase from moderately halophilic *Bacillus* sp. C14 isolated from Van soda lake. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10:369-374 (2008).
- Baker-Austin C. and Dopson M. Life in acid: pH homeostasis in acidophilic, *Trends in Microbiology*, 15: 165-171 (2007).
- Brochier-Armanet, C., Talla, E., Gribaldo, S., The multiple evolutionary histories of dioxygen reductases: Implications for the origin and evolution of aerobic respiration. *Molecular Biology Evolution*, 26:285-297 (2009).
- Dudeja S., Bhattacharjee A. B. and Chela-Flores J. Microbial mats in Antarctica as models for the search of life on the Jovian moon Europa. In: J. Seckbach and A. Oren (eds.) *Microbial Mats*. In the book series of *Cellular Origins, Life in Extreme Habitats and Astrobiology (COLE)*, Springer, (2010).
- Echigo A., Hino M., Fukushima T., Mizuki T., Kamekura M. and Usami R. Endospores of halophilic bacteria of the family *Bacillaceae* isolated from non-saline Japanese soil may be transported by Kosa event (Asian dust storm) *Saline Systems*, 1:8. (2005).
- Filee, J., Siguier, P., Chandler, M., Insertion sequence diversity in archaea. *Microbiol Molecular Biology Evolution* 71:121-157 (2007).

Garcia MT, Mellado E, Ostos JC and Ventosa A *Halomonas organivorans* sp. Nov, a moderate halophile able to degrade aromatic compounds *Int, Syst, Evol, Microbiol*, 54:1723-1728 (2004).

Horikoshi K. Alkaliphiles: some applications of their products for biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 63: 735–750 (1999).

Irwin J. A., Baird A. W. Extremophiles and their application to veterinary medicine. *Irish Veterinary Journal*, 57(6): (2004).

Lillo, L. G. & Rodriguez-Valera, F. Effect of Culture Conditions on Poly (beta-Hydroxy-butyric Acid) production by *Haloferax mediterranei*. *Appl Environ Microbiol*, 56:2517-2521 (1990)..

Lim J. M., Jeon C. O., Lee S. M., Xu L. H., Jiang C. L. and Kim C. J.. *Bacillus salarius* sp. nov., a halophilic, spore-forming bacterium isolated from a salt lake in China. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*., 56:373–377 (2006b).

Lovley DR, Phillips EJP, Gorby YA, Landa ER. Microbial reduction of uranium, *Nature*, 350: 413-16 (1991).

Margesin R. and Schinner F. Potential of halotolerant and halophilic microorganisms for biotechnology, *Extremophiles* 5/73-83 (2001).

Mesbah N. M., Cook G. M. and Wiegel J. The halophilic alkalithermophile *Natranaerobius thermophilus* adapts to multiple environmental extremes using a large repertoire of Na⁺(K⁺)/H⁺ antiporters. *Molecular Microbiology*, 74(2):270-281 (2009).

Mesbah N. M., Hedrick D. B., Peacock A. D., Rohde M. and Wiegel J, *Natranaerobius thermophilus* gen. nov., sp. nov., a halophilic, alkalithermophilic bacterium from soda lakes of the Wadi An Natrun, Egypt, and proposal of *Natranaerobiaceae* fam. nov. and *Natranaerobiales* ord. nov. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 57: 2507-2512 (2007).

Matsumi, R., Atomi, H., Driessen, A.J., van der Oost, J., Isoprenoid biosynthesis in Archaea - Biochemical and evolutionary implications. *Research Microbiol* (2010).

Moreno MDL, Garcia MT, Ventosa A and Mellado E Characterisation of *Salicola* sp. IC 10, a lipase and protease producing extreme halophile. FEMS Microbiol Ecology 68: 59-71 (2009).

Morozkina E. V., Slutskaya E. S., Fedorova T. V., Tugay T. I., Golubeva L. I. and Koroleva O. V. Extremophilic microorganisms: Biochemical adaptation and biotechnological application. Applied Biochemistry and Microbiology., 46: 1-14 (2010).

Niehaus F., Bertoldo C., Kähler M., Antranikian G. 1999. Extremophiles as a source of novel enzymes for industrial application. Applied. Microbiol. Biotechnol., 51: 711-729 (1999).

Ollivier B., Caumette P., Garcia J. L. and Mah R. A. Anaerobic bacteria from hypersalin environments. Microbiology Reviews 58(1):27-38 (1994).

Oren A, *Halobacterium sodomense* sp.nov, a dead sea *halobacterium* with an extremely high magnesium required, Int J Syst Bacteriol, 33:381-386 (1983).

Perry J.J, T.J. Stately, S. Lory .Microbiology “cours et question de revisions” Ed. Dunod, pp : 397-403 (2004).

Quadri.I et al. Microbiological Research 186–187 (2016) 119–131.

Quesada E., Bejar V., Valderrama M. J. and Ramos-Cormenzana A. Growth characteristics and salt requirement of *Delaya halophila* in a defined medium.Curr.Microbiol., 16:21-25 (1987).

Satyanarayana T., Raghukumar C. and Shivaji S. Extremophilic microbes: Diversity and perspectives. Curr. Sci., 89:78-90 (2005)..

Soboh B., Linder D., Hedderich R. Purification and catalytic properties of a CO-oxidizing:H₂-evolving enzyme complex from *Carboxydotherrmus hydrogenoformans*. Eur. J. Biochem., 269:5712-5721 (2002).

Thomas Brock, *Thermus aquaticus*, Bactérie thermophile grossie au microscope Reservoir Eng 11:285-291 (1993).

Ventosa A, Neito J.J and Oren A, Biology of moderately Halophilic grampositive Microbiol, Mol, Biol Rev 62(2): 504-544 (1998).

Ventosa A., Mellado E., Sanchez-Porro. And Marquez M.C. Halophilic and Halotolerant Micro-Organisms from Soils. In P.Dion and C.S. Nautiyal (eds). Microbiology of Extremes Soils. Soil Biology 13. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp87-115 (2008).

Vincent W. F., Mueller D. R. and Bonilla S. Ecosystems on ice: the microbial ecology of Markham Ice Shelf in the high Arctic. Cryobiology 48:103–112 (2004).

Weber A. P. M., Oesterhelt C., Gross W., Brautigam A., Imboden L. A., Krassovskaya I, EST-analysis of the thermo-acidophilic red microalga *Galdieria sulphuraria* reveals potential for lipid A biosynthesis and unveils the pathway of carbon export from rhodoplasts. 55: 17-32 (2004).

Woese R. The must be prokaryote somewhere: Microbiology's search for it self. Microbiological reviews, American of microbiology. pp: 1-9 (1994).

Woolfolk CA, Whiteley HR. Reduction of inorganic compound with molecular hydrogen by *Micrococcus lactilyticus* I. : Stoichiometry with Compounds of Arsenic, Selenium, Tellurium, Transition and Other Elements. Journal of Bacteriology 84: 647-58 (1962)

Zhao J., Li. J and Kong F, Biocontrol activity against *Botrytis cinera* by *Bacillus subtilis* 728 isolated from marine Ann. Microbiol 53: 29-35 (2003)

WEBOGRAPHIE:

Brett Leigh Dick, Microbial life in alkaline environments, <http://serc.carleton.edu/microbelife/extreme/alkaline/index.html> (2010)

Castle Geysir en éruption, Parc national de Yellowstone, Wyoming, USA, http://fr.wikipedia.org/wiki/Parc_national_de_Yellowstone.

Ectoïne as a Compatible Solute in a Moderately Halophilic Eubacterium, *Halomonas* électronique, http://fr.wikipedia.org/wiki/Thermus_aquaticus (1969).

Guillaume Callu, l'écophysiologie des bactéries, *Halobacterium salinarum*, Biologie-Géologie, 1, 2008, www.spectrosciences.com/spip.php?article59> Didier Pol <http://www.didier-pol.net/3halobact.htm> (2008).

Michael Daly, ITEM image de *Deinococcus radiodurans*, USUHS, Bethesda, Maryland, USA. http://www.usuhs.mil/pat/deinococcus/index_20.htm (2006).