

*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département de Biochimie - Microbiologie*



*Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de Master
Filière: Biotechnologie
Spécialité: Biotechnologie Microbienne*

Thème

*Etude bibliographique portant sur les
environnements chauds: Les microorganismes
thermophiles et leurs applications*

Travail réalisé par:

M^{lle}: MAOUCHI Soucina

M^{lle}: MEDJEDOUB Dounia

Soutenu le 25/10/2020, devant le jury composé de:

M^{me} BEN AHMED DJILALI A. Maître de Conférences A à l'UMMTO Présidente

M^r BOUACEM K. Maître de Conférences B à l'UMMTO Promoteur

M^{me} BENZAOUZ K. Maître Assistante A à l'UMMTO Examinatrice

Année universitaire: 2019 – 2020



*Remerciements
et dédicaces*

Remerciements

Comme l'a dit un jour l'ancien président des Etats-Unis, Bill Clinton: « Nous ne pouvons construire notre propre avenir sans aider les autres à construire le leur.»

Par cette citation, nous voudrions remercier les personnes qui nous ont accompagné dans la réalisation de ce mémoire.

Merci de nous avoir aidé à construire notre avenir.

Durant ces cinq années, nous avons eu l'occasion de côtoyer un grand nombre de personnes qui ont pris le temps d'échanger avec nous et partager leur connaissance, nous ne les remercions jamais assez.

*Tout d'abord, nos plus profonds et sincères remerciements à notre promoteur, **Mr BOUACEM K**, Maître de Conférence Classe B à l'UMMTO, pour sa disponibilité, sa gentillesse, sa sagesse, ses conseils et pour l'attention qu'il a porté à ce travail, son rôle de guide pendant toute cette période et pour ses encouragements.*

*Nos sincères remerciements à **M^{me} BEN AHMED DJILALI A.**, Maître de Conférences Classe A à l'UMMTO, d'avoir accepté de présider le jury de notre soutenance et d'examiner notre travail.*

*Nous tenons aussi à remercier **M^{me} BENZAZZOUZ K**, Maître Assistante Classe A à l'UMMTO, d'avoir accepté de faire partie du jury et d'examiner notre travail.*

Nous remercions aussi l'ensemble de nos enseignants de la Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques, Département de Biochimie – Microbiologie à l'UMMTO, pour tout le savoir qu'ils nous ont transmis durant ces cinq années.

*Nous tenons aussi à remercier toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin pour finaliser notre travail, une pensée particulière pour **KOKENE TAKFARINAS**.*

*Je tiens d'abord à dédier ce modeste travail à mon défunt père **HASSEN**, que Dieu ait son âme, qui serait sans doute fier de mon parcours et heureux de me voir ponctuer mes études avec ce diplôme.*

Ton décès prématuré m'a laissé un immense vide dans mon cœur.

...Repose en paix cher papa...

You are no longer where you were, but you are all over where I am

*Je dédie aussi ce travail à ma très chère mère **IZARA**, qui m'a tant soutenu, qui m'a tant donné et qui a tant souffert pour mon éducation et pour mon bonheur, les mots ne me suffiront jamais pour témoigner ma gratitude et mon amour pour elle.*

*Un moment de plaisir de dédier ce travail à mon seul et cher frère **ABDELKARIM**, mon guide, mon modèle, mon repère, celui qui m'a tout appris, qui m'encourage sans cesse, et qui est fier de là où je suis aujourd'hui.*

*À mes chères et adorables sœurs, **GHENIMA** et **ZOIRA**, en signe d'amour, de reconnaissance, et de dévouement dont elles ont fait preuve à mon égard, je ne les remercierai jamais assez pour tout ce qu'elles ont fait pour moi.*

*Je dédie également ce travail à la femme de mon frère **OUNISSA**, qui m'a tant soutenu.*

*Aussi à ma grand-mère **TAMAZOUZI**, qui a toujours été là pour moi et qui a toujours su faire rejaillir cette étincelle au fond de moi avec les mots justes.*

*Et aussi à mon binôme et chère copine, **MEDJEDOUB DOUNIA**, avec qui j'ai passé les moments les plus beaux et sans qui ce travail ne serait pas possible.*

Enfin, à tous mes amis, qui m'ont encouragé tout le long de cette période.

Soucina

Je dédie ce modeste travail

À ma très chère mère « TASSADIT », qu'elle trouve ici toute ma gratitude qui, si grande qu'elle puisse être, ne sera à la hauteur de ses sacrifices et de ses prières pour moi.

À celui qui a toujours garni mes chemins avec force et lumière, mon cher papa « MOHAMMED ».

À mes sœurs adorées, « SOUHILA, LYNDIA, ASSIA et KENZA », pour leurs encouragements continus et leurs amour inconditionnel.

À mes chers frères « MUSTAPHA, SOFIENE et LOUNES », pour leur soutien sans faille et à qui je souhaite beaucoup de réussite dans la vie.

À mon binôme et chère copine MAOUCHI SOUCINA, avec qui j'ai partagé les plus beaux moments et aussi sans qui ce travail ne serait pas possible.

À mes cher(e)s et adorables ami(e)s.

A dark blue vertical bar is positioned on the left side of the page. From the bottom of this bar, several thin, light blue lines extend upwards and outwards, creating an abstract, grass-like or reed-like pattern.

Listes des figures et tableaux

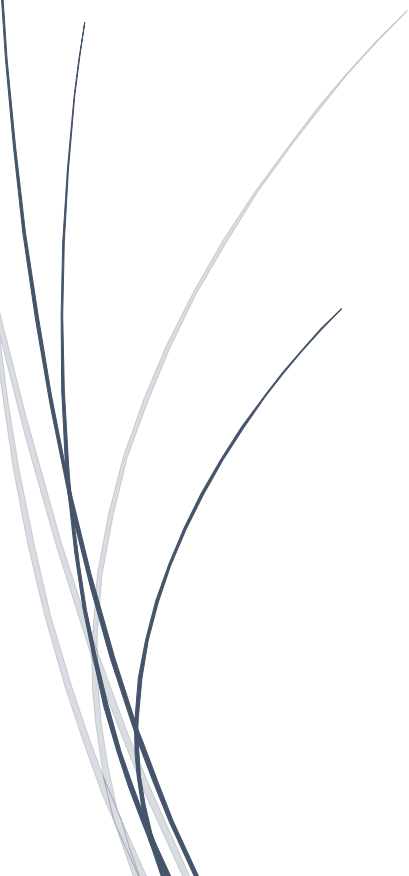
Liste des figures

Figure 1: Exemples de biotopes naturels chauds	3
Figure 2: Exemples de sources thermales dans le monde	4
Figure 3: Cascades thermales de Hammam D'bagh (Meskhoutine) à Guelma (Algérie)	8
Figure 4: Effet de la température sur les taux de croissance de microorganismes	10
Figure 5: Arbre phylogénétique du vivant d'après Woese modifié par Stetter (2006)	12

Liste des tableaux

Tableau I: Classification des eaux thermales	6
Tableau II: Quelques exemples de stations thermales médicalisées en fonction de leur nature minérale	9
Tableau III: Exemples d'enzymes thermostables isolées des microorganismes thermophiles et leurs applications biotechnologiques	26

Sommaire



Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	1
1. Biotopes chauds	2
1.1 Biotopes naturels	2
1.1.1 Biotopes terrestres	2
1.1.2 Biotopes marins.....	2
1.2 Biotopes artificiels thermiques	3
2. Sources thermales.....	3
2.1 Définition	3
2.2 Composition des eaux thermales.....	5
2.3 Classification des eaux thermales	5
2.4 Effets thérapeutiques des eaux thermales.....	7
3. Biodiversité taxonomique et métabolique des thermophiles	10
3.1 Thermophilie	10
3.2 Microorganismes thermophiles	11
3.3 Phylogénie des procaryotes thermophiles	11
3.3.1 <i>Bacteria</i>	13
3.3.2 <i>Archaea</i>	14
3.4 Besoins nutritifs des bactéries thermophiles	15
3.5 Adaptations physiologiques à la thermophilie	16
3.5.1 Protéines	16
3.5.2 Lipides.....	16
3.5.3 Acides nucléiques.....	16
4. Biotechnologie des thermophiles	17
4.1 Applications basées sur les cellules entières	17
4.1.1 Agents de minéralisation	17
4.1.2 Production d'hydrogène.....	18
4.1.3 Piles à combustible microbien.....	18
4.2 Applications basées sur les biomolécules	18
4.2.1 Thermoenzymes	18
4.2.1.1 Cellulases	19
4.2.1.2 Xylanases	20
4.2.1.3 Amylases.....	20
4.2.1.4 Protéases.....	21
4.2.1.5 Lipases.....	22
4.2.1.6 Chitinases	23
4.2.1.7 Pectinases	24
4.2.1.8 Glucose-isomérase.....	24
4.2.1.9 Enzymes utilisées en biologie moléculaire	25
4.2.2 Production de biopolymères.....	27
Conclusion.....	28
Références bibliographiques.....	30

A dark blue vertical bar is positioned on the left side of the page. From its base, several thin, light blue lines curve upwards and outwards, creating an abstract, grass-like or reed-like pattern.

Introduction générale

Les microorganismes sont omniprésents et habitent tout environnement pouvant leur offrir des conditions idéales pour leur croissance et leur reproduction et ne cessent d'occuper une place de plus en plus importante dans notre vie, toute en prenant compte de leur contribution significative dans les divers domaines industriels et dans l'évolution de la biotechnologie.

Compte tenu du degré d'adaptabilité des microorganismes, ces derniers peuvent se trouver même dans des environnements extrêmes tels que les sources thermales, la glace, sources hydrothermales sous-marines et les marais salants, en développant de différentes stratégies moléculaires afin de survivre dans des conditions hostiles à la vie (Schlegel et Jannasch, 2006). Ce qui a permis au monde scientifique d'étudier un tout nouveau groupe de microorganismes fascinants sous l'appellation « microorganismes extrêmophiles ». En effet, les scientifiques ont été très intéressés à en apprendre davantage sur les caractéristiques et les différents mécanismes permettant la survie de ces microorganismes dans de tels milieux extrêmes (Quérellou et Guézennec, 2010).

Parmi les microorganismes extrêmophiles, on en distingue les thermophiles se développant à de hautes températures, regroupant deux groupes majeurs, dont les thermophiles (>60°C) et les hyperthermophiles (>80°C) (Madigan et Martinko, 2007). Ces derniers sont présents dans les environnements volcaniques, les sources thermales, les fumerolles, les geysers et même les événements hydrothermaux. On les trouve également dans les environnements chauds artificiels. L'étude de ces microorganismes est devenue un domaine de recherche majeure et fascinant pour les microbiologistes et les biochimistes. En effet, l'utilisation de ces microorganismes et de leurs métabolites et enzymes qu'ils sécrètent ont un large éventail d'exploitation dans de nombreuses applications industrielles, agricoles et médicales et offrent des solutions potentielles aux dommages environnementaux et à la demande de biocarburants (Aanniz et *al.*, 2015; Urbietta et *al.*, 2015).

Les enzymes des microorganismes thermophiles appelées également « thermoenzymes », sont thermostables et résistantes. Elles ont la capacité de catalyser des réactions à de hautes températures tout en conservant leurs propriétés et activités enzymatiques. Ce qui favorise leur sélection dans les procédés industriels par rapport aux enzymes mésophiles qui autrement leurs fonctions seraient limitées ou altérées. Les propriétés de thermostabilité des thermoenzymes ont suscité l'intérêt de divers secteurs industriels, tels que les industries alimentaires, chimiques, pharmaceutiques, du papier, de la pâte à papier, des détergents, du traitement des déchets et le secteur de la synthèse organique (Aanniz et *al.*, 2015).

L'Algérie est un pays riche par sa diversité géologique et écologique et compte 280 sources thermales dont certaines sont exploitées pour leurs bienfaits notamment thérapeutiques [1]. Ces écosystèmes se présentent comme des champs d'investigations privilégiés pour la recherche de nouvelles souches productrices de biomolécules, essentiellement des enzymes. Plusieurs chercheurs souhaitent les explorer de manière intensive afin d'isoler de nombreuses enzymes thermostables. Des recherches sont en cours pour déterminer leur potentiel à produire plusieurs nouveaux produits importants sur le plan biotechnologique (Nshimiyimana et *al.*, 2018).

Dans la présente étude, nous allons mettre l'accent sur les microorganismes thermophiles notamment sur leurs enzymes thermostables, en passant en revue les écosystèmes chauds, en particulier, les sources thermales dans le monde et en Algérie. L'attention sera mise également sur la phylogénie, physiologie, mécanismes d'adaptations et applications biotechnologiques des microorganismes thermophiles.



Synthèse *Bibliographique*

1. Biotopes chauds

Les biotopes chauds sont des environnements dans lesquels vivent les thermophiles. Ils sont généralement d'origine naturelle associés à des zones tectoniques actives mais peuvent aussi avoir une origine artificielle.

1.1 Biotopes naturels

1.1.1 Biotopes terrestres

Dans les biotopes terrestres, lorsque l'eau surchauffée approche de la surface, la pression baisse et l'eau est projetée comme des jets ou bulles d'eau chaude connus sous le nom de geysers (Ferrera et Reysenbach, 2007).

La nature de l'eau va dépendre des roches traversées et elle est généralement associée à une activité volcanique, la température de l'eau *in situ* sera en fonction de la profondeur. Les geysers correspondent à l'émission d'un fluide très minéralisé, qui a traversé profondément la croûte terrestre et qui ressort à 100°C et à des pH acides ou basiques à la surface de la terre, c'est le cas des sources chaudes localisées en Islande, en Algérie ou encore dans le Parc national de Yellowstone (Figure 1) (Grégoire et *al.*, 2009).

Certaines sources chaudes présentent des variations de températures, alors que d'autres sont très stables, avec des écarts de 1 ou 2 °C au maximum, sur plusieurs années. De plus, des sources différentes peuvent avoir des compositions chimiques et des pH très variés. Quel que soit leur composition, ces sources contiennent généralement suffisamment d'éléments nutritifs pour permettre le développement de populations microbiennes, souvent abondantes, de chimioorganotrophes et chimiolithotrophes hyperthermophiles (Madigan et Martinko, 2007).

1.1.2 Biotopes marins

L'eau de mer s'infiltré dans les fissures et se réchauffe au contact de la roche basaltique (ou roches profondes du manteau ou ultramafiques) en fusion, pouvant atteindre des températures très élevées (jusqu'à 400 °C) puis, par d'autres fissures, remonte en surface. Ce fluide hydrothermal est riche en composés réduits tels que H₂S, CH₄, NH₄⁺ ainsi qu'en éléments métalliques tels que Mn²⁺, Fe²⁺, Li⁺, Cd²⁺, Cu²⁺ et Zn²⁺. Le mélange de ce fluide avec l'eau de mer froide (2°C) provoque la précipitation de divers sulfures métalliques et de sulfate de calcium anhydre, origine des « fumeurs » et « diffuseurs », qui constituent progressivement les cheminées hydrothermales. C'est dans cette zone de mélange turbulent, entre le fluide hydrothermal toxique surchauffé et l'eau de mer oxygénée et froide, que se développe la vie hydrothermale (Minic et *al.*, 2006). La figure 1 présente quelques exemples de biotopes naturels chauds.

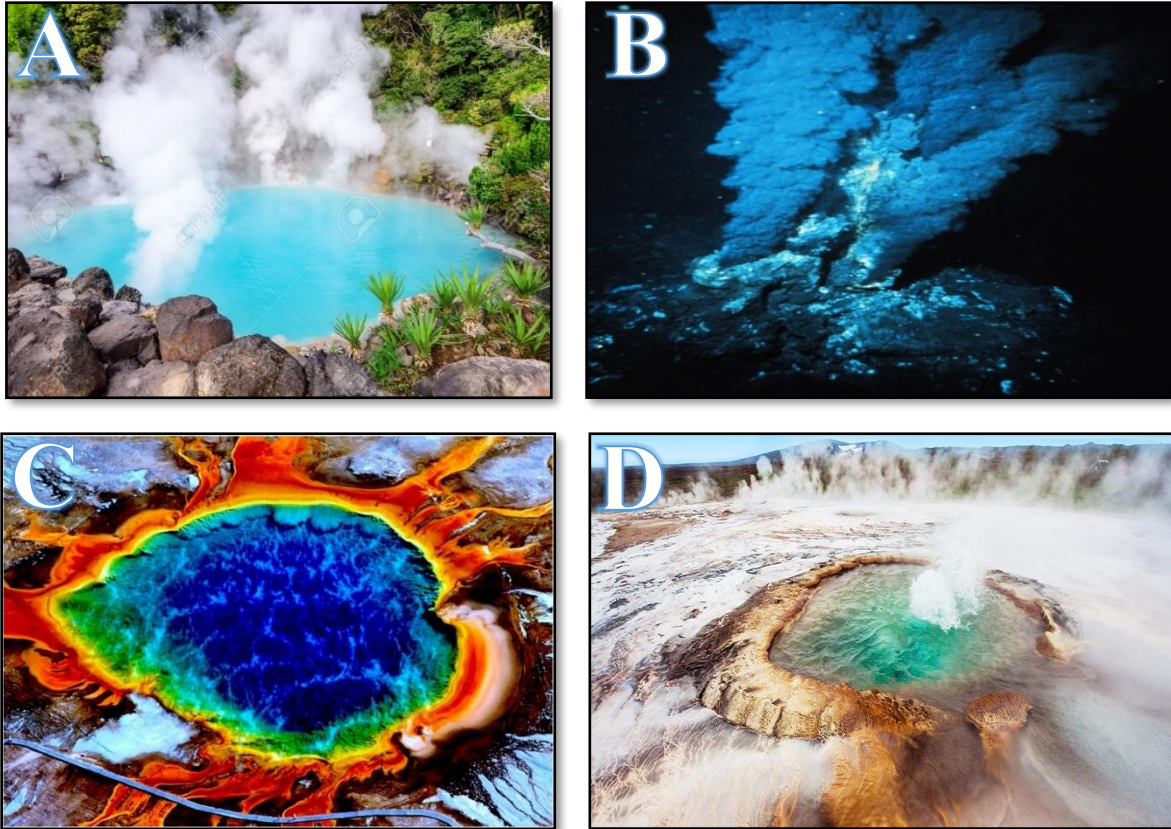


Figure 1: Exemples de biotopes naturels chauds. A. Source d'eau chaude, Beppu, à la mer "Hell", Japon [2], B. Fumeur noir dans l'océan Atlantique [3], C. Source d'eau chaude, parc de Yellowstone [4], Etats-Unis, D. Geysier, Islande [5].

1.2 Biotopes artificiels thermiques

Les thermophiles habitent également les systèmes thermiques artificiels tels que les circuits d'alimentation et les réservoirs d'eau chaude, les centrales nucléaires, les usines géothermiques, les puits et forages de pétrole, le compost et les bioréacteurs.

2. Sources thermales

Les sources thermales sont des environnements naturels présents partout dans le monde et leur utilisation représente une ressource socio-économique ayant un impact sur les applications médicales et de bien-être de *sanus per aquam* (SPA). Des équilibres physico-chimiques et microbiologiques caractérisent ces niches écologiques et leurs connaissances sont essentielles pour définir les propriétés de l'eau et soutenir une gestion appropriée (Valeriani et *al.*, 2018).

2.1 Définition

Les sources chaudes sont des émissions d'eau chaude et de vapeur d'eau. Leur origine vient de la profondeur. Lorsqu'elles atteignent la surface, elles se refroidissent et se condensent, ce qui donne une eau très chaude. Dans certains cas, la vapeur dérivée du magma rencontre l'aquifère souterrain sur son chemin de montée et convertit son eau en eau chaude (José-Miguel et *al.*, 1989).

Schoeller (1962) considère que les eaux thermales sont des eaux dont la température à l'émergence est supérieure à la température annuelle de l'air, plus 5°C au lieu de l'émergence. Selon la température, les eaux sont froides (inférieures à 20°C), hypothermales (21 à 35°C), mésothermales (35 à 45°C) ou hyperthermales (supérieures à 45°C).

Les sources thermales les plus connues et bien étudiées sont situées en Amérique du Nord (Parc national de Yellowstone), en Islande, à la Nouvelle-Zélande, au Japon, en Italie et à l'ex-Union soviétique (Lund et John, 2007). Dans la figure 2, sont citées quelques sources thermales dans le monde.

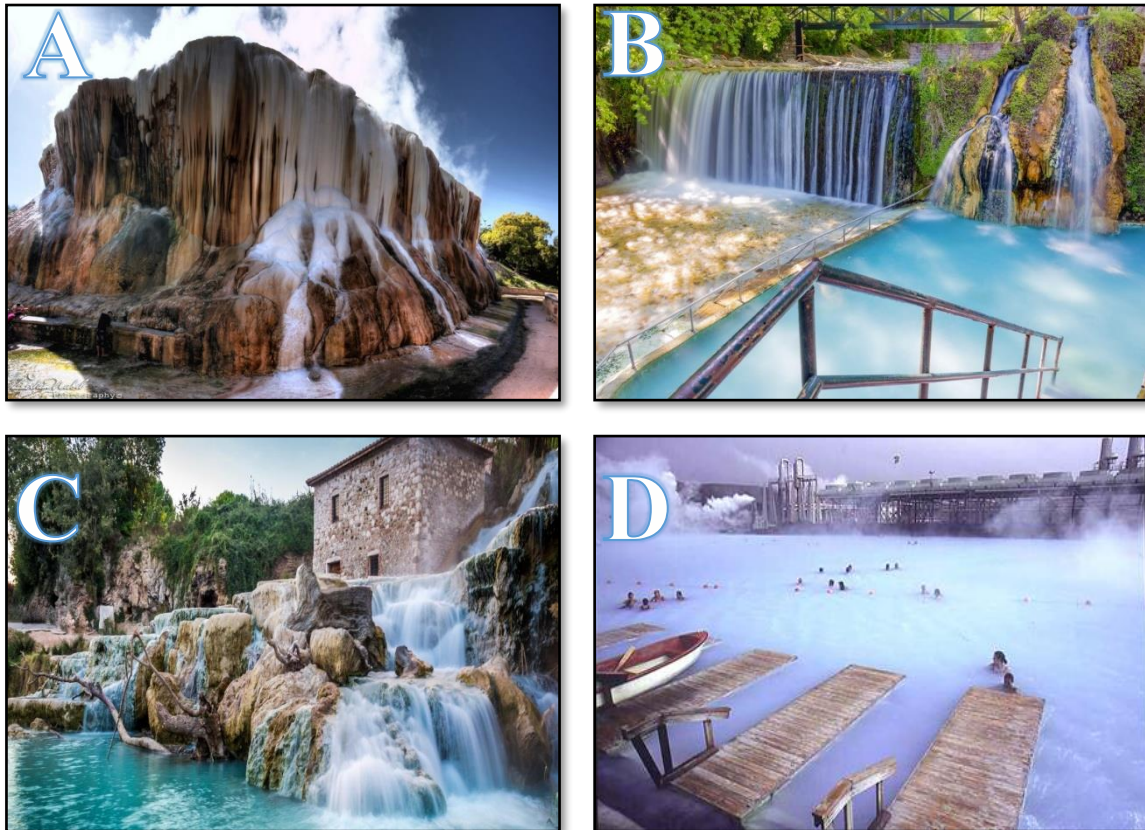


Figure 2: Exemples de sources thermales dans le monde. A. Cascades d'eau chaude de Hammam Meskhoutine de Guelma (Hammam D'bagh) en Algérie [6], B. Sources thermales et thérapeutiques naturelles en Grèce [7], C. Les eaux thermales de Saturnia en Italie [8], D. Sources thermales en Islande [9].

Le territoire algérien est aussi riche, il existe 280 sources thermales d'après une étude d'actualisation effectuée en 2015 [1], dont le nombre croit régulièrement en s'approchant vers le Nord-Est. En effet, les températures mesurées à l'émergence varient de 19°C à Ben Haroun à 98°C à Hammam Meskhoutine (Ouali, 2008).

En Algérie, trois zones géothermiques ont été délimitées selon certaines considérations géologiques et thermiques: (1) les dolomies tlemcéniennes dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie, (2) les formations carbonatées dans la partie Nord-Est de l'Algérie et (3) le réservoir de grès de l'Albian au Sahara (Sud de l'Algérie). Les températures les plus élevées enregistrées ont été de 68°C pour la zone Ouest (Hammam Bouhnifia), 80°C pour la zone centrale (Hammam El Biban) et 98°C pour la zone Est (Hammam D'bagh). Au sud, les sources thermales ont une température moyenne de 50°C. La zone Nord-Est du pays, couvrant une superficie de 15 000 km², reste potentiellement la zone géothermique la plus intéressante (Saibi, 2009).

Les sources thermales les plus minéralisées sont en relation directe avec les sédiments gypso-salins du Trias, si répandu en Algérie, ce cas est rencontré à titre d'exemple à Hammam Melouane 29,42 g/L, Hammam El Biban 15g/L, Hammam Salhine 9 g/L (Ouali, 2008).

Les eaux thermales sont actuellement utilisées en balnéologie et dans quelques utilisations directes expérimentales (serres) à Ouargla et Touggourt (Nord-Est du Sahara algérien). Récemment, certaines fermes piscicoles ont commencé à Ghardaïa et Ouargla en utilisant les eaux chaudes de l'aquifère Albien (Sud de l'Algérie) pour produire du poisson Tilapia. Le Nord-Ouest de l'Algérie bénéficie d'une pompe à chaleur géothermique pour le chauffage et le refroidissement des locaux en utilisant une eau thermale de 46°C avec un débit de 25 m³/h (Saibi, 2009).

2.2 Composition des eaux thermales

Les éléments les plus retrouvés dans une eau thermo-minérale sont:

- Des gaz: Oxygène, Azote, Dioxyde de carbone et Hydrogène sulfuré.
- Des sels minéraux: Chlorures, Sulfates, Calcium, Magnésium, Sodium, Potassium.
- Des oligo-éléments: Cuivre, Zinc, Arsenic, Bore, Brome, Fer, Manganèse...etc.

2.3 Classification des eaux thermales

Selon la température à laquelle se trouve l'eau souterraine, différents types de minéraux seront dissous; raison pour laquelle, une classification des différents types d'eaux thermales doit être faite en fonction de leur température, des origines géologiques, de la composition chimique et de la composition minérale.

Tableau I: Classification des eaux thermales [10].

Température	Origine géologique	Composition chimique	Composition minérale
<p>Eaux froides Moins de 20°C.</p>	<p>Eaux magmatiques Eaux dont l'origine est à caractère éruptif et le débit constant en composition et température.</p> <p>Eaux telluriques Leur débit varie suivant l'époque de l'année puisqu'il provient de l'infiltration des pluies.</p>	<p>Sources d'eaux acides pH inférieur à 7.</p>	<p>Bicarbonatées Eaux de basse minéralisation, alcalines et froides. Elles peuvent s'associer à la composition d'un autre type de minéraux qui vont varier leurs actions. Les plus communes sont: sodiques, calciques, mixtes, sulfatées et chlorurées.</p> <p>Ferrugineuses Eaux qui contiennent une forte teneur en fer, bien qu'elles soient accompagnées généralement de bicarbonates ou de sulfates.</p> <p>Sulfureuses Eaux hyperthermales, dont le pH est de 6.5 et minéralisation moyenne sulfatée-sulfureuse.</p> <p>Sulfatées Ces eaux se caractérisent par leurs températures et minéralisation qui sont variables. Elles peuvent être classées comme : Sodiques et magnésiques.</p> <p>Sulfurées Eaux dont lesquelles prédomine le soufre, ce qui donne un parfum caractéristique des œufs putréfiés. Dans leur composition elles peuvent être accompagnées de sodium ou de calcium.</p>
<p>Eaux hypothermales De 21°C à 35°C.</p>		<p>Sources d'eaux neutres pH égal à 7.</p>	
<p>Eaux mésothermales De 35°C à 45°C.</p>			
<p>Eaux hyperthermales Plus de 45°C.</p>		<p>Sources d'eaux alcalines pH supérieur à 7.</p>	

2.4 Effets thérapeutiques des eaux thermales

L'utilisation thérapeutique des propriétés de certaines eaux minérales naturelles pour guérir ou soulager des personnes souffrantes de pathologies diverses est nommée le thermalisme. La composition ionique d'une eau minérale ou thermale est d'une très grande importance puisque c'est la richesse de celle-ci ou de sa pauvreté en anions et cations qui déterminent l'effet thérapeutique de cette eau au cours d'une cure.

➤ Eaux bicarbonatées

Leur utilisation se fait par ingestion, en agissant sur le métabolisme de sorte qu'elles alcalisent le pH gastrique si elles sont prises à jeun, en diminuant l'acidité et en aidant le processus digestif. Elles stimulent aussi la sécrétion pancréatique et ont des fonctions diurétiques [11].

- **Bicarbonatées sodiques:** Indiquées dans les affections gastriques comme l'hypermotilité intestinale, les ulcères duodénaux, les diarrhées et affections hépatiques et rénales.
- **Bicarbonatées calciques:** Elles améliorent la digestion.
- **Bicarbonatées mixtes:** Elles améliorent la digestion.
- **Bicarbonatées sulfatées:** Indiquées dans des empoisonnements hépatiques et en cas de constipation.
- **Bicarbonatées chlorurées:** Indiquées dans les affections rhumatisantes.

Leur application peut se faire par voie orale, en provoquant de la stimulation gastrique et du péristaltisme intestinal, ou par voie externe, indiquées dans des cas d'effort par leur important effet sédatif, diminution de l'hypertonie musculaire, augmentation du flux sanguin et comme effet analgésique et anti-inflammatoire [10].

Ces eaux sont aussi indiquées pour les affections de l'appareil locomoteur, telles que les contractures musculaires. Leur application se fait au moyen de douches, de jets, bains et piscine. Indépendamment des indications précédentes, cette application va augmenter les défenses de la peau et les muqueuses. Elles sont aussi utilisées par le biais d'inhalations et d'étuves. Ce type d'eaux est stimulant pour les fonctions organiques, endocriniennes et métaboliques [12].

➤ Eaux ferrugineuses

Elles sont indiquées dans des cas d'anémies, anémie sidéropénique et d'autres types d'anémies, puisque ce type d'eau est considéré comme reconstituant. Les eaux ferrugineuses sont indiquées en cas d'obésité, de rhumatismes, d'affections hépatiques, biliaires et pour certaines affections dermatologiques, ainsi que pour des bouleversements du développement infantile [12].

➤ **Eaux sulfureuses**

Elles se trouvent dans des sols boueux et sont indiquées pour les affections des articulations, comme processus pour lutter contre les rhumatismes et les douleurs postopératoires de l'appareil locomoteur, anémies, neuropathies, dermatoses prurigineuses, inflammations allergiques et affections respiratoires comme l'asthme. Les eaux sulfureuses sont contre-indiquées dans des cas d'hypertension et hémoptysie [10].

➤ **Eaux sulfatées**

Elles sont également indiquées pour lutter contre les affections dermatologiques, prurits et même dans quelques cas d'empoisonnements médicamenteux ou alimentaires [13].

- **Sulfatées calciques**

Ces eaux sont indiquées dans des affections gastriques, intestinales, hépatoptoses et biliaires en produisant une importante action diurétique et l'élimination de l'acide urique.

- **Sulfatées chlorurées**

Ces eaux sont indiquées dans des affections digestives, de la gastrite, en cas de constipation et aussi dans des cas d'insuffisance hépatique. La technique d'application de ce type d'eau se fait principalement par ingestion. La wilaya de Guelma possède d'importantes sources thermales qui attirent quotidiennement des milliers de curistes (Figure 3) [10; 13].



Figure 3: Cascades thermales de Hammam D'bagh (Meskhoutine) à Guelma (Algérie)
(Kaki, 2016).

➤ **Eaux sulfurées**

Leur administration est encore effectuée au moyen d'ingestion mais d'autres types d'applications sont également possibles. Elles sont indiquées principalement pour des processus rhumatisants, dermatologiques comme l'eczéma, kératose, psoriasis ou prurits, et respiratoires chroniques comme la laryngite, rhinite, bronchite, et l'asthme. Elles sont utilisées en postopératoire pour l'appareil locomoteur et les traumatismes. Elles ont aussi un effet sur les affections hépatiques [11].

➤ **Eaux radioactives**

Eaux à haute teneur en gaz radon, un gaz radioactif d'origine naturelle. Ce type d'eaux est utilisé en thermalisme et n'a aucun effet négatif. Au contraire, elles sont indiquées pour les affections du système neurovégétatif, endocrinien et pour les modifications dans le système immunitaire, ainsi que les affections respiratoires chroniques, rhumatologiques et dermiques. Les soins se font par des bains ou des inhalations.

Ces eaux sont particulièrement indiquées pour les traitements anti-effort, dépressions et modifications du système nerveux, le radon ayant des caractéristiques sédatives et analgésiques [12].

Tableau II: Quelques exemples de stations thermales médicalisées en fonction de leur nature minérale (Ouali, 2008).

Nature des eaux	Exemples de stations thermales en Algérie
Eaux bicarbonatées	Hammam Meskhoutine (Guelma) entre 90 et 98°C Hammam Salhine (Biskra) 70°C
Eaux ferrugineuses	Hammam Melouane (Blida)
Eaux sulfureuses	Hammam Bouhadjar entre 35 et 72°C Hammam Salhine (Biskra) 70°C
Eaux sulfatées	Hammam Boughrara (Maghnia) 45°C Hammam Righa (Ain Defla) 54°C
Eaux sulfurées	Hammam Rabbi (Saïda) 40°C Hammam Meskhoutine (Guelma) entre 90 et 98°C Hammam Salhine (Biskra) 70°C
Eaux radioactives	Hammam Bouhnifia (Mascara) entre 20 et 70°C Hammam Guergour (Sétif) Hammam Meskhoutine (Guelma) entre 90 et 98°C

3. Biodiversité taxonomique et métabolique des thermophiles

3.1 Thermophilie

La température est une variable importante dans chaque écosystème. Elle a été considérée en biologie comme un élément de base de classification. De ce fait, quatre groupes majeurs sont définis selon les températures optimales de croissance: les psychrophiles qui ont une T_{opt} de croissance basse, les mésophiles ayant une T_{opt} moyenne, les thermophiles ayant une T_{opt} élevée et les hyperthermophiles ayant une T_{opt} très élevée (Figure 4).

La vie aux températures élevées est classée en forme thermophile ou hyperthermophile. Les thermophiles sont des microorganismes qui se développent à des températures relativement élevées, entre 45°C et 80°C. Les hyperthermophiles qui sont des thermophiles particulièrement extrêmes pour lesquelles les températures optimales sont au-delà de 80°C (Madigan et Martinko, 2007).

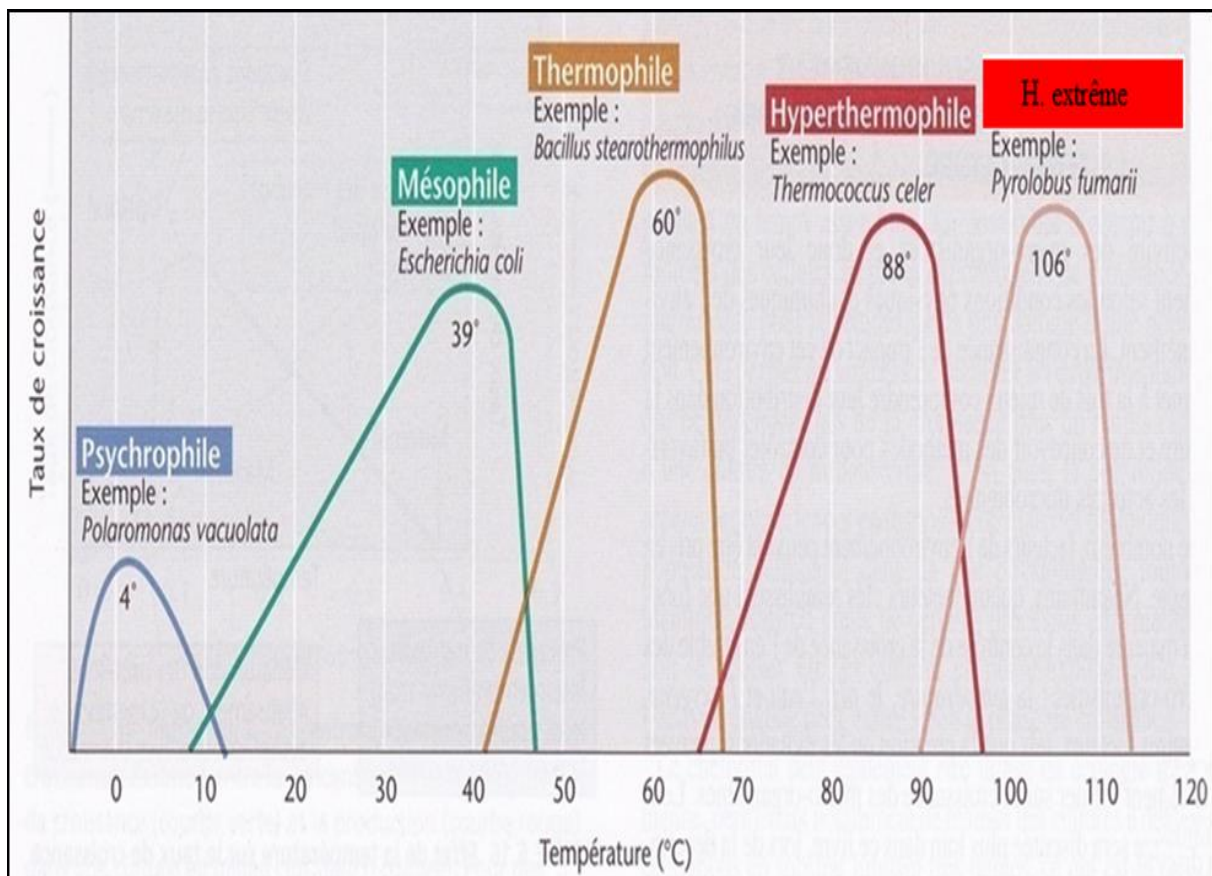


Figure 4: Effet de la température sur les taux de croissance de microorganismes (psychrophiles, mésophiles, thermophiles, hyperthermophiles et hyperthermophiles extrêmes) (Madigan et Martinko, 2007).

3.2 Microorganismes thermophiles

Les microorganismes thermophiles (du grec *thermê*, chaleur et *philein*, aimer) sont des microorganismes ayant besoin d'une température élevée pour se développer. Plusieurs définitions ont été proposées pour définir la thermophilie. La plus reconnue est celle qui a été proposée par Thomas Brock, le microbiologiste à l'origine de la découverte des microorganismes thermophiles. Selon cette définition, un thermophile est un être vivant dont la température optimale de croissance se situe au-delà de 60°C (Alain et *al.*, 2010).

Une définition plus pratique et plus large a été proposée par Karl Stetter et qualifie les organismes thermophiles, tous les êtres vivants se développant à des températures supérieures à 45°C. Cette dernière définition est intéressante car elle définit 4 sous catégories au sein des thermophiles:

- **Les thermophiles modérés:** dont les conditions optimales de croissance se situent entre 55 et 65°C.
- **Les thermophiles extrêmes:** dont la température optimale de croissance est comprise entre 65 et 80°C.
- **Les hyperthermophiles:** dont la température optimale de croissance est supérieure à 80°C.
- **Les hyperthermophiles extrêmes:** dont la température optimale de croissance est supérieure à 105°C.

Des microorganismes thermophiles ont été isolés d'environnements naturels, soumis au volcanisme ou au géothermalisme (sources hydrothermales océaniques profondes, sources chaudes terrestres...etc), mais aussi de biotopes artificiels où les températures sont élevées (canalisations domestiques d'eaux chaudes, installations industrielles...etc) (Alain et *al.*, 2010).

3.3 Phylogénie des procaryotes thermophiles

Les études phylogénétiques basées sur l'analyse de l'ARN ribosomal ont permis de mettre en évidence l'existence de trois domaines distincts dont deux domaines sont affiliés aux procaryotes *Bacteria* et *Archaea* et un troisième domaine regroupant les eucaryotes *Eukarya*. Cette division a été confirmée par les résultats de la génomique (Quérellou et Guézennec, 2010). Les microorganismes thermophiles appartiennent aux deux domaines de la vie *Bacteria* et *Archaea*. Ils sont présents dans les branches les plus profondes de l'arbre du vivant tel qu'il a été proposé par Woese (Figure 5).

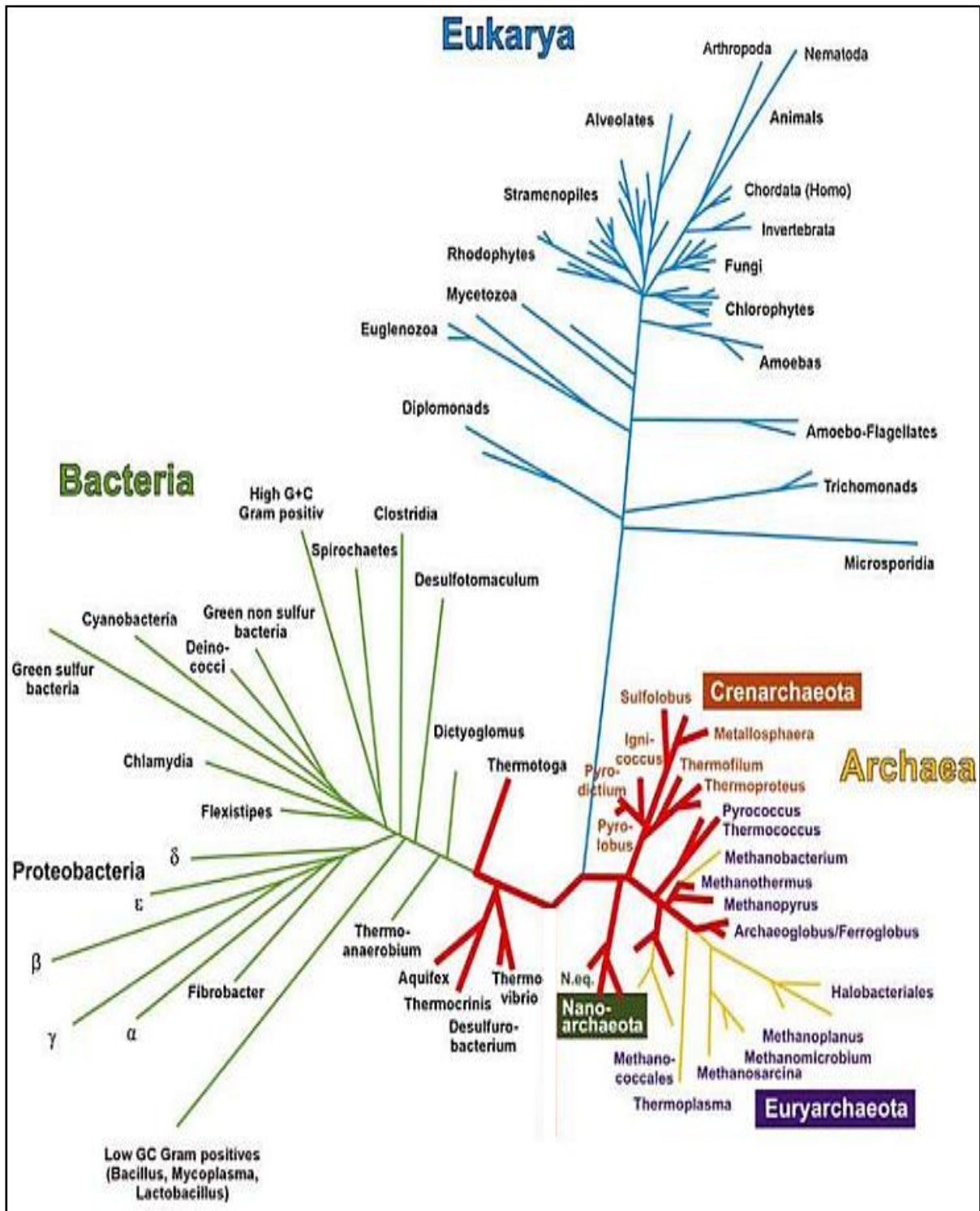


Figure 5: Arbre phylogénique du vivant d'après Woese modifié par Stetter (2006) (Les hyperthermophiles sont représentés en traits rouges) (Byrne, 2008).

3.3.1 *Bacteria*

Les microorganismes thermophiles du domaine *Bacteria* possèdent des caractéristiques physiologiques et métaboliques très diverses incluant des phototrophes, des chimiolithotrophes, des autotrophes et des hétérotrophes.

➤ **Les bactéries thermophiles hétérotrophes**

La plupart des bactéries thermophiles isolées sont des hétérotrophes. Parmi ceux-ci, un seul groupe peut être défini comme hyperthermophile: les *Thermotogales*, ces thermophiles sont entourés d'une gaine " une toge" qui entoure la cellule. *Thermotoga* a été isolé à partir des événements hydrothermaux, des sources terrestres et des puits de pétrole. *Thermotoga* spp. sont fermentaires et se développent mieux en anaérobiose lors de l'utilisation de thiosulfate comme accepteur d'électrons. Un autre groupe d'hétérotrophes obligatoires est les *Thermales* où *Thermus aquaticus* a été la première isolée d'une source thermale alcaline dans le Parc National de Yellowstone (Guezennec, 2004).

Un grand nombre d'isolats thermophiles sont des bactéries à Gram positif appartenant à l'ordre de *Bacillales* et de *Clostridiales*, dont beaucoup forment des spores résistantes à la chaleur et jouent un rôle clé dans la dégradation de la matière organique dans la plupart des environnements à température modérée. Souvent, ces bactéries se développent dans des conditions extrêmes autres que les températures élevées telles que la forte acidité ou alcalinité, et sont métaboliquement très diverses (Fardeau et al., 2004; Urios et al., 2004; Kublanov et al., 2007).

La plupart des isolats utilisent la matière organique comme donneurs et accepteurs d'électrons telles que *Bacillus vulcani* et *Clostridium fervidus*, mais certaines espèces utilisent des composés inorganiques comme accepteurs d'électrons. *Thermoterrabacterium ferrireducens* réduit le fer ferrique, *Ammonifex degensii* utilise des nitrates, sulfates et du soufre élémentaire (Fardeau et al., 2004; Urios et al., 2004; Kublanov et al., 2007).

Des représentants de la classe des *Deltaproteobacteria* ont été également isolés d'écosystèmes thermiques. Ce sont des sulfato-réducteurs, qui utilisent des composés organiques comme donneurs d'électrons (*Desulfacinum hydrothermale*, *Thermodesulforhabdus norvegicus*) (Ferrera et Reysenbach, 2007; Holden, 2009).

➤ **Les bactéries thermophiles phototrophes**

On retrouve essentiellement les cyanobactéries qui effectuent la photosynthèse oxygénée. Elles se trouvent dans les milieux chauds aux températures relativement hautes. *Synechococcus lividus* forme des tapis microbiens épais à des températures comprises entre 60 et 74°C coexistant souvent avec des phototrophes anaérobies comme les espèces du genre *Chloroflexus*. Ces dernières sont des bactéries filamenteuses présentant une motilité glissante. Elles contiennent des vésicules à pigments appelées chlorosomes (Ferris et al., 1996; Ferrera et Reysenbach, 2007).

D'autres photoautotrophes anoxygéniques, sont également retrouvés dans les sources thermales, telles que les bactéries pourpres sulfureuses (*Proteobacteria*) et vertes sulfureuses (*Chlorobi*). Dans les environnements thermiques contenant de sulfure, ces organismes oxydent le sulfure en soufre qui s'accumule à l'intérieur (*Proteobacteria*) ou à l'extérieur (*Chlorobi*) de la cellule, puis oxydé en sulfate (Ferrera et Reysenbach, 2007).

➤ **Les bactéries thermophiles chimiolithoautotrophes**

Certaines bactéries sont capables de fixer le dioxyde de carbone en utilisant de l'énergie chimique (chimiolitho-autotrophie). La plupart des bactéries isolées à partir des événements hydrothermaux appartiennent aux *Epsilonproteobacteria*, aux *Thermales*, aux *Thermotogales* et aux *Aquificales*. Les bactéries de l'ordre *Aquificales* utilisent l'hydrogène, le soufre et le thiosulfate comme donneurs d'électrons et l'oxygène et/ou les nitrates comme accepteurs d'électrons. Quelques membres de cet ordre peuvent également croître sur des composés organiques. On retrouve également dans ces catégories des bactéries, les *Thiotrix* et *Thiobacillus* qui oxydent les sulfures, ce sont des petits bacilles à Gram négatif, certains peuvent se développer à des pH très acides, d'autres à des températures élevées (Capdepuuy et Canellas, 1995; Nakagawa et al., 2005; Ferrera et Reysenbach, 2007).

3.3.2 Archaea

Chez les *Archaea* thermophiles et hyperthermophiles, il existe deux principaux phylums, celui des *Euryarchaeota* et des *Crenarchaeota*.

• Phylum des *Euryarchaeota*

Ce phylum regroupant des hyperthermophiles (croissance possible jusqu'à 110°C pour certains) producteurs de méthane ou *Methanoarchaea*, le plus souvent chimiolithotrophes autotrophes et des chimioorganotrophes. On distingue chez les *Methanoarchaea* en particulier, les *Methanococcales* isolés d'environnements hydrothermaux sous-marins ou terrestres, les *Methanopyrales* dont l'unique représentant *Methanopyrus kandleri*, qui est la *Methanoarchaea* la plus thermophile. Parmi les chimioorganotrophes, les *Thermoplasmatales* sont les thermophiles les plus acidophiles connues chez les anaérobies. Ils colonisent des habitats chauds et acides tels que les terrils et des sources chaudes terrestres. En ce qui concerne les *Thermococcales*, le plus souvent isolés de sources hydrothermales océaniques profondes et côtières mais également des eaux de gisements pétroliers, ils sont capables de se développer sur des substrats organiques complexes (protéines, sucres) et ont la capacité de réduire le soufre élémentaire en hydrogène sulfuré (H₂S). Enfin, les *Archaeoglobales* représentés par 3 genres seulement (*Archaeoglobus*, *Geoglobus* et *Ferroglobus*) qui sont impliqués dans la réduction des composés soufrés ou du fer (Grégoire et al., 2009; Tomova et al., 2011).

- **Phylum des *Crenarchaeota***

Il est composé en majorité de microorganismes chimiolithotrophes autotrophes et quelques espèces chimioorganotrophes. On citera en particulier les *Sulfolobales*, qui sont plutôt spécifiques des habitats chauds terrestres, alors que les *Desulfurococcales* colonisent essentiellement les habitats volcaniques sous-marins. Ces derniers sont des hyperthermophiles chimioorganotrophes aérobies ou anaérobies qui métabolisent le soufre. Ils peuvent être également chimiolithotrophes stricts, souvent capables de réduire le soufre élémentaire. Une des caractéristiques majeures de cet ordre est qu'il comporte les organismes les plus thermophiles connus à ce jour; les espèces des genres *Pyrodictium* et *Pyrolobus* sont, en effet, capables de se développer à des températures supérieures à 100°C (Utturkar et al., 2016). *Pyrolobus fumarii* isolé d'une cheminée hydrothermale de la dorsale medioatlantique, détient le record de la température de croissance la plus élevée (113°C) chez les procaryotes. En ce qui concerne les *Sulfolobales*, les espèces du genre *Sulfolobus* plus particulièrement sont capables d'oxyder les composés soufrés (H₂S et SO) en acide sulfurique tandis que celles du genre *Acidianus* sont capables aussi bien d'oxyder SO en acide sulfurique que de le réduire en H₂S (Grégoire et al., 2009; Susanti et al., 2016).

3.4 Besoins nutritifs des bactéries thermophiles

Les bactéries thermophiles ont parfois des besoins nutritifs particuliers voire même essentiels. Sürücü (1999) a exposé dans ses travaux les besoins spécifiques des thermophiles au niveau des acides aminés, des vitamines et des minéraux. La méthionine s'avérait être absolument essentielle dans ce cas, alors que l'histidine stimulait la croissance. Les vitamines B1 (thianine) et B2 (riboflavine) stimulaient aussi la croissance. Au niveau des minéraux, le magnésium mais aussi le calcium et le fer semblaient très importants. Ses travaux démontraient aussi un effet nutritionnel synergique dans ses cultures, car les espèces dominantes étaient moins exigeantes sur le plan nutritionnel, en culture mixte qu'en culture pure.

L'identification de facteurs physiologiques et environnementaux qui peuvent limiter une croissance appropriée des bactéries thermophiles est importante pour le développement d'applications industrielles (enzymes, métabolites) à partir de ces microorganismes. En effet, plusieurs réactions peuvent survenir à des températures élevées. Par conséquent, la modification chimique des milieux de culture à des températures élevées est un facteur déterminant pour la croissance efficace des thermophiles (Hupé, 2008).

3.5 Adaptations physiologiques à la thermophilie

La vie à haute température est rendue possible par un certain nombre de mécanismes adaptatifs et/ou de molécules que l'on retrouve uniquement chez les thermophiles. L'analyse de biomolécules importantes chez les bactéries thermophiles a révélé des différences structurales subtiles dans les protéines, les acides nucléiques et les lipides (Alain et *al.*, 2010).

3.5.1 Protéines

Les protéines des thermophiles et hyperthermophiles sont plus thermostables que celles de leurs homologues mésophiles et fonctionnent de manière optimale à haute température (Madigan et *al.*, 2010). Néanmoins, il n'existe aucune règle générale permettant d'expliquer cette thermostabilité, chaque protéine adoptant sa propre stratégie de stabilisation. Cette thermostabilité intrinsèque des protéines en général et des enzymes en particulier est le plus souvent due à des modifications mineures de la séquence en acides aminés favorisant le repliement de la protéine sous une forme compacte avec un nombre réduit de cavités internes, un nombre élevé de ponts ioniques contribuant à maintenir l'ensemble et à résister à la dénaturation. La synthèse en grandes quantités de solutés osmocompatibles contribue également à protéger les protéines d'une dégradation thermique (Santos et *al.*, 2011).

3.5.2 Lipides

Les membranes cytoplasmiques des microorganismes thermophiles possèdent une structure particulière leur permettant de rester stables et fonctionnelles aux températures élevées. Celles des bactéries hyperthermophiles sont composées d'une bicouche lipidique formée d'acides gras liés à un glycérol par une liaison ester et sont exceptionnellement riches en acides gras saturés. Cette richesse en acides gras saturés permet d'augmenter la température de fusion de la membrane tout en maintenant une stabilité et une fluidité optimales dans des conditions de thermophilie (Alain et *al.*, 2010).

3.5.3 Acides nucléiques

On pense qu'une protéine uniquement présente chez les espèces hyperthermophiles pourrait être responsable de l'absence de dénaturation de l'ADN chez les procaryotes. Tous les hyperthermophiles produisent une ADN topoisomérase appelée ADN gyrase reverse. Cette topoisomérase provoque la formation de surenroulement positif de l'ADN au contraire des ADN gyrases présentes chez tous les procaryotes non thermophiles qui provoquent la formation d'un surenroulement négatif. Un autre mécanisme fait intervenir une augmentation des composés cellulaires solubles capables d'empêcher les lésions chimiques de l'ADN, tel que 2,3diphosphoglycérate de potassium cyclique présent en concentrations élevées chez *Methanopyrus*. En plus des sels et de l'ADN gyrase reverse, d'autres protéines des hyperthermophiles peuvent intervenir dans le maintien de l'intégrité de la double hélice d'ADN. Par exemple, une petite protéine thermostable appelée Sac7d, présente chez *Sulfolobus*, se fixe dans le petit sillon de l'ADN de façon non spécifique et augmente ainsi la température de dénaturation de l'ADN en augmentant fortement la formation de boucles dans la molécule d'ADN (Madigan et Martinko, 2007).

4. Biotechnologie des thermophiles

Les thermophiles sont utilisés dans divers procédés se déroulant à haute température et intéressant des domaines aussi variés que la chimie, la pharmacie, l'agro-alimentaire, ou encore la biologie moléculaire.

Les travaux de recherche sur les thermophiles sont pour une grande part motivés par les applications biotechnologiques, deux types d'applications différentes peuvent être distingués. La première repose sur l'utilisation directe des organismes et la seconde sur leurs biomolécules, ce sont les enzymes, mais aussi les protéines, les lipides, les osmolytes (thermolytes) et une grande diversité de métabolites secondaires.

Les enzymes issues des microorganismes isolés des sources thermales présentent un potentiel important, en raison de leur thermostabilité et leur aptitude à résister à la dénaturation sous pression du fait de la piézophilie ou de la piézotolérance de leurs hôtes (Alain et *al.*, 2010). Les enzymes des thermophiles ont déjà trouvé ou pourraient trouver des applications dans le blanchiment du papier, la conversion de l'amidon en dérivés sucrés, la dégradation de composés protéiques résistants, l'industrie textile ou le travail de laboratoire sur l'ADN. Plusieurs enzymes provenant de thermophiles des sources thermales sont commercialisées: nombreuses polymérases, ligases, protéases, phosphatases alcalines, beta-mannanase...etc.

4.1 Applications basées sur les cellules entières

Il s'agit d'applications qui requièrent l'action directe d'une population microbienne, voire d'un mélange complexe de différentes espèces. Parmi ces applications:

4.1.1 Agents de minéralisation

Dans les traitements industriels de minéraux, des microorganismes 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 furiosus*, ont la capacité de transformer le chlorure d'or en or insoluble. Alors que les microorganismes acidothermophiles comme *Sulfolobus metallicus* et *Metallosphaera sedula* sont utilisées dans l'extraction du cuivre à partir de minéraux sulfurés ou encore dans le traitement de certains minerais sulfurés telle que la pyrite. La manipulation et la réutilisation des pneus usés posent de sérieux problèmes et le recyclage des matériaux en caoutchouc est préférable d'un point de vue économique et environnemental. L'espèce *Pyrobaculum furiosus* est capable de désulfurer le caoutchouc en donnant un produit avec de bonnes propriétés mécaniques (Bredberg et *al.*, 2001).

4.1.2 Production d'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 NiFe hydrogénase cytoplasmique issue de l'hyperthermophile *Thermococcus kodakaraensis* est active de façon optimale à 90°C pour la production d'hydrogène avec le méthylviologène. La même enzyme membranaire est identifiée chez la bactérie *Thermotoga tengcongensis* et autres membres de l'ordre des *Thermotogales* (Kádár et al., 2003).

4.1.3 Piles à combustible microbien

Les thermophiles constituent un gisement très largement inexploré dans ce domaine. Une étude réalisée a démontré qu'une communauté microbienne thermophile isolée de sédiments marins était capable de produire un courant électrique dans une pile à combustible fonctionnant à 60°C en utilisant de l'acétate comme carburant (Mathis et al., 2008).

4.2 Applications basées sur les biomolécules

4.2.1 Thermoenzymes

Les enzymes thermostables "thermoenzymes" des microorganismes thermophiles sont des biocatalyseurs qui ont des caractéristiques uniques telles que la température, la stabilité chimique et la stabilité du pH. Elles peuvent être utilisées dans plusieurs processus industriels, dans lesquels elles remplacent les enzymes mésophiles ou les produits chimiques. Les thermophiles et hyperthermophiles appartenant à plusieurs genres: *Bacillus*, *Clostridium*, *Pyrococcus*, *Thermus*, *Thermotoga* et *Aquifex* ont été explorés pour les thermoenzymes (Sharma et al., 2019).

Les thermoenzymes sont souvent utilisées lorsque le processus enzymatique est compatible avec les conditions de processus existantes (à haute température). Les principaux avantages de l'exécution de processus à des températures plus élevées présentent un risque réduit de contamination microbienne, une viscosité plus faible, des taux de transfert améliorés et une solubilité améliorée des substrats (Bruins et al., 2001). Les thermoenzymes sont également dotées de propriétés telles que la tolérance aux solvants, la résistance aux dénaturants, la sélectivité du substrat et des vitesses de réaction plus élevées; ainsi, ce qui les rendent potentiellement plus adaptées aux applications par rapport aux mésoenzymes. Les mécanismes adaptatifs des thermoenzymes comprennent des modifications de la séquence et la composition en acides aminés, des schémas de liaisons hydrogènes, des interactions électrostatiques, des liaisons disulfures, des interactions hydrophobes et de la capacité de liaison aux métaux, résultant en une structure conformationnelle supérieure (Sharma et al., 2019).

Des études montrent que les thermophiles sont une bonne source de nouveaux catalyseurs qui présentent un grand intérêt industriel. Les enzymes thermostables dégradant les polymères telles que les amylases, les pullulanases, les xylanases, les protéases et les cellulases devraient jouer un rôle important dans les industries alimentaire, chimique, pharmaceutique, du papier, de la pâte à papier et du traitement des déchets (Bruins et *al.*, 2001). Des efforts de recherche considérables ont été déployés pour mieux comprendre la stabilité des thermoenzymes. La surexpression des thermoenzymes dans *Escherichia coli* standard permet la production de quantités beaucoup plus importantes d'enzymes, qui sont faciles à purifier par traitement thermique, avec une disponibilité plus large et un coût inférieur (Bruins et *al.*, 2001).

L'étude des biocatalyseurs thermostables pourrait aider à simplifier la base moléculaire de la stabilité et pourrait aider à l'élaboration d'enzymes de conception *via* la bioingénierie et les approches informatiques. De tels biocatalyseurs adaptés peuvent être des candidats pour des applications de procédés industriels potentiellement nouvelles (Sharma et *al.*, 2019).

4.2.1.1 Cellulases

La cellulose est une ressource renouvelable à fort potentiel pour la bioconversion de bioproduits à valeur ajoutée. Elle peut être dégradée par les cellulases produites par les bactéries cellulolytiques (Rigoldi et *al.*, 2018).

Les cellulases (EC 3.2.1.4) comptent parmi les enzymes industrielles les plus importantes connues à ce jour. Elles convertissent la cellulose en sucres qui conviennent à la consommation humaine. Ces sucres peuvent à leur tour être fermentés pour générer du bioéthanol et des produits biosourcés (Shabih et *al.*, 2018). Les cellulases trouvent également une application dans l'industrie textile, où elles sont utilisées pour le polissage des tissus et dans l'industrie des détergents à lessive (Rigoldi et *al.*, 2018).

En effet, une bactérie thermophile productrice d'une cellulase thermostable a été isolée d'un district de sources chaudes et identifiée comme *Geobacillus* sp. HTA426. L'enzyme a été purifiée et a présenté une activité optimale à 60°C et à pH 7. Elle est également stable sur une large plage de températures de 50°C à 70°C après 5 h d'incubation (Potprommanee et *al.*, 2017).

Une nouvelle cellulase thermostable et halotolérante appelée CelDZ1 de *Thermoanaerobacterium* sp. a été purifiée et caractérisée. Cette dernière a présenté une activité optimale à 70°C et à pH 5 avec une bonne thermostabilité (Zarafeta et *al.*, 2016). Une autre cellulase halotolérante, appelée Bc22Cel, produite par la souche *Bacillus* sp. SR22 a été purifiée et caractérisée. La Bc22Cel a présenté une activité maximale à 60°C et à pH 6,5 (Dos Santos et *al.*, 2018).

4.2.1.2 Xylanases

Les xylanases jouent un rôle clé dans la dépolymérisation enzymatique de l'hémicellulose dont le xylane est le constituant majeur, pour donner des sucres monomères. Récemment, les xylanases reçoivent une attention croissante pour la production de sucres à partir de la biomasse lignocellulosique. Ces enzymes ont élargi leur utilisation dans de nombreuses industries de transformation, telles que la pâte, le papier, les aliments et le textile (Rigoldi et *al.*, 2018; Bouacem et *al.*, 2014).

Les xylanases d'*Actinomadura* sp. et *Nonomuraea flexuosa* se sont révélées avoir une thermostabilité élevée. En raison de leur stabilité thermique et pH élevé, les xylanases fusionnées de champignons et d'actinomycètes ont été utilisées dans les industries du papier et de la pâte à papier. *Streptomyces* spp. sont capables de produire des niveaux élevés de xylanase et de fournir un bioblanchiment efficace. De même, elles sont capables d'hydrolyser les déchets de paille et de produire du biogaz (Rigoldi et *al.*, 2018).

Bouacem et *al.* (2014) ont travaillé sur la production et la caractérisation partielle d'une xylanase thermostable à partir d'une nouvelle bactérie anaérobie thermophile *Caldicoprobacter algeriensis* TH7C1^T, isolée d'une source chaude du nord-est de l'Algérie. Une production maximale de l'enzyme (140U/mL) a été enregistrée en phase stationnaire à 70°C et à pH 11. L'enzyme s'est avérée stable à 50, 60, 70 et 80°C, avec des temps de demi-vie de 10, 9, 8 et 4 h, respectivement, avec une augmentation de l'activité enzymatique en présence du calcium. Cette xylanase thermo-alkaline-tolérante de *C. algeriensis* pourrait être utilisée dans le processus de blanchiment de la pâte à papier.

Un nouveau gène *xynBCA*, codant pour une xylanase (XynBCA), a été cloné à partir du génome de *Caldicoprobacter algeriensis* TH7C1^T et exprimé de manière recombinante dans *Escherichia coli* BL21. L'enzyme recombinante purifiée était thermostable et a présenté une activité maximale à pH 6,5 et température optimale de 80°C, avec un temps de demi-vie de 20 minutes à 80°C. L'étude de la xylanase XynBCA dans des expériences de bioblanchiment de la pâte kraft a montré une efficacité (Mhiri et *al.*, 2020).

4.2.1.3 Amylases

L'industrie de la transformation de l'amidon en produits plus précieux tels que les dextrines, le glucose, le fructose, le maltose et le tréhalose, utilise des amylases (EC 3.2.1.x) thermostables microbiennes. Dans tous les processus de conversion de l'amidon, des températures élevées sont requises pour liquéfier l'amidon et le rendre accessible à l'hydrolyse enzymatique (Antranikian, 2008).

L' α -amylase (EC 3.2.1.1) est un bon représentant des enzymes hydrolytiques thermostables, elle constitue un modèle intéressant pour l'étude des bases structurales de la thermostabilité des protéines. Parmi les bactéries productrices, *Bacillus* sp. est largement utilisée pour la production d' α -amylase thermostable afin de répondre aux besoins industriels. *Bacillus subtilis*, *Bacillus stearothermophilus*, *Bacillus licheniformis* et *Bacillus amyloliquefaciens* sont de bons producteurs d' α -amylase thermostable, et elles ont été largement utilisées pour la production commerciale de l'enzyme pour diverses applications (Prakash et Jaiswal, 2010).

Les applications courantes de cette famille d'enzymes sont dans les industries de la boulangerie, de la brasserie et de l'alcool, où des amylases thermophiles et acidophiles de *Streptomyces erumpens* sont utilisées. Les amylases thermostables de *Nocardiopsis* sp. sont également utilisées dans les industries de la boulangerie et du papier. L'amylase de *Thermobifida* sp. est utilisée pour la production de maltotriose à partir d'amidon. De plus, dans l'industrie de la transformation de l'amidon, un certain nombre d'autres amylases spécifiques sont couramment utilisées pour la synthèse de différents maltooligosaccharides (Rigoldi et al., 2018).

Des préparations commercialisées d' α -amylases issues de souches thermophiles de *Bacillus*, et d'archées hyperthermophiles agissant à des températures supérieures à 100°C, sont utilisées pour la liquéfaction de l'amidon et le désencollage des textiles (Cobucci-Ponzano et al., 2011).

Allala et al. (2019) ont travaillé sur la purification et la caractérisation d'une nouvelle α -amylase thermostable (TfAmy48) de la souche HB23 de *Tepidimonas fonticaldi* isolée d'une source hydrothermale algérienne. TfAmy48 a montré une stabilité à 80°C et à pH 8, avec une tolérance extrême aux solvants organiques et une excellente compatibilité avec certains détergents à lessive commerciaux. La souche HB23 a été soumise à une optimisation statistique visant à augmenter la production d' α -amylase par des paramètres culturels et nutritionnels. Le son de blé, a été le facteur qui a influencé positivement sa production et a présenté une multiplication par dix par rapport au niveau de production non optimisé. Ces propriétés font de l'enzyme TfAmy48 un candidat potentiel comme bioadditif de nettoyage dans une composition détergente (Allala et al., 2020).

4.2.1.4 Protéases

Les protéases (EC 3.4.x) des thermophiles présentent un intérêt accru en raison de leurs applications variées dans les industries agro-alimentaires, textiles, biomédicales, pharmaceutiques, des détergents et dans la gestion des déchets en tannerie. Parmi les bactéries, *Bacillus* sp. a été une source majeure de protéases thermostables (Sinha et Khare, 2013). Dans l'industrie des détergents, la sérine protéase KP-43 de *Bacillus halmapalus* KSM-KP43 présente une activité maximale entre les pH 6 et 12 et les températures de 45 à 65°C (Quéréllou et Guézennec, 2010).

Des protéases thermostables résistantes aux agents tensio-actifs anioniques ou non ioniques actives à des températures supérieures à 60°C trouvent leurs applications comme composantes des détergents de vaisselle (Banerjee et al., 1999; Niehaus et al., 1999).

En raison de leur compatibilité avec les conditions opératoires, des protéases thermoactives sont utilisées dans certaines techniques de biologie moléculaire, tels que la réaction de polymérisation en chaîne (PCR) et le séquençage de l'ADN (Vieille et Zeikus, 2001).

Parmi les protéases, l'aminopeptidase qui hydrolyse les résidus d'acides aminés des portions N-terminales des protéines. Ces aminopeptidases ont un large éventail d'applications dans divers domaines tels que l'industrie pharmaceutique où elles représentent un outil moléculaire important pour l'analyse des séquences protéiques et dans l'industrie alimentaire pour l'amélioration de la saveur. Lorsqu'elles sont combinées avec d'autres protéases, elles conduisent à une dégradation complète des protéines, telles que la caséine, le gluten, le collagène et la gélatine, aidant à l'utilisation des nutriments (Rigoldi et al., 2018).

On trouve aussi la sérine alcaline protéase thermostable extracellulaire, appelée SAPCG, produite à de grandes quantités par la bactérie thermophile *Caldicoprobacter guelmensis* D2C22^T isolée de la source thermale de Guelma en Algérie. L'enzyme a été purifiée et a montré une activité protéase optimale à 70°C et à pH 10, avec la caséine comme substrat. La thermoactivité et la thermostabilité du SAPCG ont été améliorées en présence du calcium et ses temps de demi-vie à 80 et 90°C étaient respectivement de 180 et 60 minutes. L'analyse des performances de lavage a révélé qu'elle pouvait éliminer efficacement les taches de sang et a présenté un certain nombre de propriétés intéressantes qui font de cette enzyme un candidat prometteur pour de futures applications en tant qu'additif dans les formulations de détergents (Bouacem et al., 2015).

Bouacem et al. (2016) ont travaillé sur l'étude d'une enzyme qui figure parmi les protéases qui est la kératinase thermostable extracellulaire (KERCA) produite à partir de la souche TH7C1^T de *Caldicoprobacter algeriensis*, isolée d'une source chaude hydrothermale en Algérie. Une activité optimale a été obtenue à 50°C et à pH 7. En effet, les propriétés de l'enzyme KERCA font d'elle une alternative potentielle prometteuse et écologique aux produits chimiques conventionnels utilisés pour l'épilation des peaux de chèvre, de mouton et de bovin dans l'industrie du cuir.

Une autre nouvelle sérine alcaline protéase extracellulaire, la subtilisine (appelée SAPN) de *Melghiribacillus thermohalophilus* Nari2A^T a été purifiée et caractérisée. L'activité optimale de la subtilisine était à 75°C et à pH 10 avec des temps de demi-vies de 9 et 5 h à 80 et 90°C, respectivement. L'enzyme est utilisée pour la production des hydrolysats bioactifs déprotéinisés (Mechri et al., 2019). On trouve également la souche *Anoxybacillus kamchatkensis* M1V qui s'est avérée d'une efficacité pour la production d'enzymes protéolytiques utilisées dans le processus de déprotéinisation (Mechri et al., 2020).

4.2.1.5 Lipases

Les lipases (EC 3.1.1.3) comptent parmi les enzymes les plus utilisées en industrie. Elles hydrolysent les triglycérides à longue chaîne pour former des diglycérides, des monoglycérides, des acides gras et du glycérol. Par leur capacité à hydrolyser les liaisons esters carboxyliques, les lipases peuvent catalyser des réactions d'estérification dans des milieux non aqueux. Elles trouvent une application dans les aliments, les détergents, les produits pharmaceutiques, industries du cuir, du textile, des cosmétiques et du papier. Dans l'industrie alimentaire, elles sont utilisées pour le traitement des graisses et des huiles. Dans les formulations détergentes, elles sont d'une grande aide pour l'élimination des lipides taches, taches d'aliments gras et sébum des tissus (Rigoldi et al., 2018).

Les lipases de différents microorganismes fournissent différentes spécificités positionnelles, spécificités des acides gras, stabilités thermiques et valeurs de pH optimales. La majorité des lipases disponibles sont dérivées à partir des mésophiles et agissent dans une large gamme de pH mais sont instables à des températures plus élevées (généralement supérieures à 70°C). Un grand nombre de lipases thermostables ont été isolées à partir de thermophiles. Certaines lipases thermostables ont été isolées de thermophiles modérés, notamment des représentants du genre *Bacillus* (*Bacillus thermoleovorans*, *Bacillus* sp., *Bacillus stearotherophilus*) (Sharma et al., 2013).

Parmi les lipases thermostables, on trouve aussi la lipase Lip501 issue de la souche thermophile *Bacillus thermoamylovorans* NB501, qui a présenté une activité optimale à 60°C et à pH 8. La thermostabilité de l'enzyme a été améliorée en présence du calcium. Cette enzyme s'est avérée efficace pour son utilisation dans l'industrie en modifiant les huiles comestibles, particulièrement en dégradant l'huile de soja. Une autre lipase extracellulaire sécrétée par la bactérie thermo-alcalophile *Geobacillus thermoleovorans* avec une thermostabilité significative à une température de 76°C. En effet, ces enzymes se sont avérées être de bons candidats pour les applications biotechnologiques (Yamada et al., 2017; Moharana et al., 2019).

4.2.1.6 Chitinases

La chitine est le deuxième biopolymère le plus abondant trouvé dans la nature après la cellulose. Les déchets chitineux peuvent constituer une menace environnementale sur leur accumulation et en raison d'une décomposition extrêmement lente. Par conséquent, les thermophiles qui produisent des enzymes plus stables dégradant la chitine peuvent être utiles dans la biorestauration et la gestion des déchets ainsi que pour aider à libérer des nutriments et à maintenir le carbone, l'azote et d'autres cycles biogéochimiques dans l'environnement. Les chitinases (EC 3.2.1.14) hydrolysant la chitine, participent à une variété de fonctions, y compris la défense, la digestion des nutriments, la morphogenèse et la pathogenèse. La plupart des procaryotes dégradant la chitine sont les bactéries glissantes: *Pseudomonas*, *Vibrio*, *Enterobacterium*, Actinomycètes, *Bacillus* et *Clostridium*. De nombreuses bactéries dégradant la chitine ont été isolées et leurs gènes respectifs ont été clonés et caractérisés. Cependant, seules quelques chitinases thermostables ont été détectées dans les microorganismes tels que: *Cohnella* sp., *Serratia marcescens* (Aliabadi et al., 2016).

Récemment, une nouvelle chitinase thermostable extracellulaire ChiA-Hh59 issue de de la souche KB-DZ44 d'*Hydrogenophilus hirschii* isolée d'une source thermale en Algérie, a été purifiée et caractérisée. L'activité chitinase maximale enregistrée pour ChiA-Hh59 était à 85°C et à pH 5. Cette chitinase est un candidat idéal pour l'hydrolyse de la chitine et de la bioconversion des déchets chitineux pour des applications potentielles dans divers domaines de la biotechnologie, de la biomédecine, de l'agriculture et de la nutrition (Bouacem et al., 2018).

4.2.1.7 Pectinases

La pectine est présente dans la partie intermédiaire des parois cellulaires végétales. Ce biopolymère est un hétéropolysaccharide ramifié se composant d'une chaîne principale de α -1,4-D-polygalacturonate partiellement méthylé. La dégradation enzymatique de la pectine est assurée par les pectinases (EC 3.2.1.15) qui sont classées en deux grands groupes: les méthylestérases, dont la fonction est d'éliminer les groupes méthoxy, le second groupe comprend les dés polymérases (hydrolases et lyases), qui attaquent la pectine et le pectate (acide polygalacturonique). La production de telles enzymes n'a été rapportée que chez les bactéries anaérobies thermophiles. Ces enzymes agissent habituellement à pH alcalin et ont besoin d'ions de Ca^{2+} . Les souches les plus productrices ont été identifiées comme membres des genres: *Paenibacillus*, *Bacillus*, *Streptomyces*...etc (Kashyap et al., 2001).

Parmi les pectinases thermostables, la pectinase de *Bacillus mojavensis* I4, laquelle a présenté une meilleure activité à température de 60°C et pH 8 avec les pelures de carotte comme substrat (Ghazala et al., 2015). On trouve également celle de la souche ZJ1407 de *Bacillus* sp., laquelle a présenté une thermostabilité significative à 80 et 90 °C dans une gamme de pH de 3 à 5 en présence des ions de baryum (Ba^{2+}) (Yu et Xu, 2018).

Les pectinases sont largement appliquées dans des processus de l'industrie alimentaire pour l'extraction et la clarification des jus de fruits, afin d'augmenter son rendement, de réduire sa viscosité et d'éclaircir sa couleur, ainsi elles sont utilisées pour le dégommeage des fibres et pour la vinification. Dans les industries du papier et du textile, ces enzymes sont de plus en plus utilisées non seulement pour des processus plus propres mais aussi pour réduire à la fois l'utilisation des matières premières et la production de déchets (Antranikian, 2008; Rigoldi et al., 2018).

4.2.1.8 Glucose-isomérases

La glucose isomérase catalyse l'isomérisation réversible du D-glucose et du D-xylose en D-fructose et D-xylulose, respectivement. L'enzyme a le plus grand marché dans l'industrie alimentaire en raison de son application dans la production de sirop de maïs à haute teneur en fructose (HFCS). Le HFCS, un mélange d'équilibre de glucose et de fructose et est 1,3 fois plus sucré que le saccharose et sert d'édulcorant à l'usage des diabétiques. L'immobilisation de la glucose isomérase fournit un moyen efficace pour sa récupération et sa réutilisation faciles et réduit le coût de son utilisation (Bhosale et al., 1996).

La glucose isomérase (GI) de la souche *Acidothermus cellulolyticus* 11B est appropriée comme nouvelle source d'enzyme produisant du sirop de maïs à haute teneur en fructose (SHTF). En effet, le gène de GI d'*Acidothermus cellulolyticus* 11B, a été cloné et surexprimé chez *Escherichia coli*. L'activité enzymatique était maximale et a été déterminée comme thermostable et stable aux acides faibles à 80°C et à pH 6,5, tout en étant significativement améliorée par le calcium et le magnésium (Mu et al., 2012).

Brown *et al.* (1993) ont pu également isoler cette enzyme à partir de *Thermotoga maritima*. L'enzyme se distingue par son extrême thermostabilité à une température optimale de 105 à 110°C avec un temps de demi-vie estimé de 10 minutes à 120°C et à pH 7, en présence de cations divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+}). Le degré élevé de thermostabilité, associé à un pH optimal neutre à légèrement acide, révèle que cette enzyme est un candidat prometteur pour l'amélioration du processus industriel d'isomérisation du glucose.

Les glucose isomérases produites par la souche B6A de *Thermoanaerobacter* et la souche 4B de *Clostridium thermosulfurogenes* ont été purifiées et ont présenté une meilleure thermostabilité à 85°C dans une gamme de pH de 5,5 à 12 en présence d'ions métalliques (Lee et Zeikus, 1991). Récemment, un nouveau gène de glucose isomérase provenant du thermophile *Caldicoprobacter algeriensis* TH7C1^T, a été cloné et exprimé avec succès dans *E. coli* HB101. L'enzyme (GICA) a été purifiée et a présenté une meilleure activité à 90°C et à pH 7 et une excellente thermostabilité avec un temps de demi-vie de 6 minutes à 100°C (Neifar *et al.*, 2019).

4.2.1.9 Enzymes utilisées en biologie moléculaire

Les ADN polymérases thermostables jouent un rôle fondamental dans les techniques d'ingénierie du vivant grâce à leur aptitude à amplifier un gène donné à des millions de copies au moyen de la réaction de PCR (Quérellou et Guézennec, 2010). La Taq polymérase isolée d'une bactérie thermophile *Thermus aquaticus* est régulièrement utilisée pour la réaction d'amplification de l'ADN, c'est la clé de la PCR grâce à sa thermostabilité, elle est capable de supporter les nombreux cycles de montée en température atteignant 94°C (Grégoire *et al.*, 2009).

Tableau III: Exemples d'enzymes thermostables isolées des microorganismes thermophiles et leurs applications biotechnologiques.

Enzymes thermostables	Microorganismes thermophiles	Propriétés d'activité (Température et pH)	Applications biotechnologiques
Cellulase	<i>Geobacillus</i> sp. HTA426	60°C et pH = 7	- Conversion de la biomasse lignocellulosique. - Industrie alimentaire. - Production de biocarburants. - Industrie textile et des détergents.
Cellulase CelDZ1	<i>Thermoanaerobacterium</i> sp	70°C et pH = 5	
Cellulase Bc22Cel	<i>Bacillus</i> sp. SR22	60°C et pH = 6,5	
Xylanase	<i>Caldicoprobacter algeriensis</i> TH7C1 ^T	70°C et pH = 11	- Dépolymérisation de l'hémicellulose. - Production de biogaz. - Production de sucres. - Industrie alimentaire, papetière et textile.
Alpha-amylase	<i>Tepidimonas fonticaldi</i> HB23	80°C et pH = 8	- Bioconversion de l'amidon. - Industrie de la boulangerie et de la brasserie. - Industrie textile et des détergents.
Sérine protéase SAPCG	<i>Caldicoprobacter guelmensis</i> D2C22 ^T	70°C et pH = 10	- Biologie moléculaire. - La déprotéinisation. - Industrie des détergents et du cuir.
Sérine protéase SAPN	<i>Melghiribacillus thermohalophilus</i> Nari2AT	75°C et pH = 10	
Kératinase KERCA	<i>Caldicoprobacter algeriensis</i> TH7C1 ^T	50°C et pH = 7	
Lipase Lip501	<i>Bacillus thermoamylovorans</i> NB501	60°C et pH = 8	- Industrie alimentaire, pharmaceutique et des détergents. - Industrie du cuir, du cosmétique et du papier.
Chitinase ChiA-Hh59	<i>Hydrogenophilus hirschii</i> KB-DZ44	85°C et pH = 5	- Bioconversion de déchets chitineux. - Industrie alimentaire et pharmaceutique. - Biomédecine et agriculture.
Pectinase	<i>Bacillus mojavensis</i> I4	60°C et pH = 8	- Industrie alimentaire, du papier et du textile.
Glucose-isomérase	<i>Acidothermus cellulolyticus</i> 11B	80°C et pH = 6,5	- Industrie alimentaire (production de sirop de maïs à haute teneur en fructose).
Taq polymérase	<i>Thermus aquaticus</i>	94°C	- Biologie moléculaire (PCR).

4.2.2 Production de biopolymères

En termes d'exploitation biotechnologique, les polymères bactériens présentent quelques atouts comme l'absence de dépendance vis à vis d'aléas climatiques et écologiques pouvant affecter la qualité, le coût et l'approvisionnement de leurs homologues extraits d'algues ou de plantes. Plus de 30 "exopolysaccharides" présentant des propriétés intéressantes ont été mis en évidence depuis la découverte des sources hydrothermales, mais les résultats les plus marquants restent pour la détermination de structures polysaccharidiques complexes. Un dérivé de bas poids moléculaire (24 000 g/mol) et fortement sulfaté (40 %) a pu ainsi être obtenu à partir d'un exopolysaccharide sécrété en conditions de laboratoire par la bactérie *Alteromonas infernus* isolée du fluide d'un site hydrothermal du bassin de Guaymas. L'étude de son mécanisme d'action par l'équipe du professeur Fischer à l'Hôpital Européen Georges Pompidou (HEGP) à Paris, a montré que tout comme l'héparine, ce dérivé inhibe la génération de thrombine (Guézennec, 2004).

Des études ont montré qu'un nombre limité de microorganismes isolés de sédiments hydrothermaux du bassin de Guaymas en Basse-Californie sont capables de synthétiser en conditions de laboratoires des "polyhydroxyalcanoates" (PHAs) (Guézennec et *al.*, 1998; Simon-Colin et *al.*, 2008). Ces PHAs sont utilisés pour la production des plastiques biodégradables (Laycock et *al.*, 2013).



Conclusion et perspectives

Notre travail s'est porté d'un côté, sur une étude bibliographique des environnements chauds et sur les microorganismes thermophiles et leurs applications d'un autre côté. On a vu que les biotopes chauds se présentent comme des champs d'investigations privilégiés pour la recherche de nouvelles souches productrices de biomolécules, notamment des enzymes hautement stables.

Nous avons constaté que le champ de recherche sur les sources thermales est très vaste et prometteur, non seulement pour leur exploitation thérapeutique à des fins récréatives, ainsi nommé le thermalisme, mais aussi pour la découverte de nouvelles souches thermophiles et hyperthermophiles. Les sources hydrothermales marines profondes sont aussi des écosystèmes où règnent conjointement des conditions de température, de pH, de pression hydrostatique, de concentrations en métaux lourds et de radiations ionisantes les plus extrêmes. Les gradients thermiques et géochimiques abrupts qui résultent du mélange entre les fluides hydrothermaux surchauffés et l'eau de mer ambiante définissent une multitude de micro-niches propices au développement de communautés microbiennes très diversifiées. Ainsi des microorganismes psychrophiles, mésophiles, thermophiles et hyperthermophiles prospèrent dans ces écosystèmes en utilisant les abondantes sources organiques et inorganiques d'énergie et de carbone disponibles.

En effet, notre thématique porte essentiellement sur l'étude des microorganismes thermophiles. Et il s'avère que ces derniers occupent, de plus en plus, une place importante dans la biotechnologie moderne en raison de leur potentiel à produire des biomolécules hautement stables. Les microbiologistes au cours de ces 20 dernières années, ont obtenu des données conséquentes concernant la diversité et la physiologie des microorganismes associées à ces écosystèmes chauds. C'est pourquoi leur isolement et leur identification à partir de sources thermales font l'objet d'étude d'intenses recherches.

Notre étude nous a permis également d'améliorer notre connaissance sur la diversité et la fonction des microorganismes thermophiles et hyperthermophiles des édifices hydrothermaux actifs. Et elle nous a montré que les paramètres environnementaux fluctuants des écosystèmes thermaux, ont une influence sur la structure des communautés microbiennes qui les colonisent. Les variations temporelles et spatiales des conditions physico-chimiques qui prévalent dans les sources thermales vont conditionner la structure et l'activité des communautés microbiennes qui y sont hébergées.


Par ailleurs, notre recherche bibliographique a mis en relief différentes activités enzymatiques des souches bactériennes thermophiles. Ces dernières possèdent des activités intéressantes pour la bioindustrie où elles sont utilisées dans diverses procédés se déroulant à haute température. Et elles sont pour une grande part, incluses dans des applications biotechnologiques, soit par leur utilisation directe, ou l'utilisation de leurs biomolécules (les enzymes, les protéines, les lipides et une grande diversité de métabolites secondaires).

Conclusion et perspectives

Les enzymes thermostables issues de microorganismes thermophiles isolés des sources thermales présentent un potentiel important, en raison de leur thermostabilité et leur aptitude à résister à la dénaturation. Les propriétés catalytiques efficaces de ces enzymes ont déjà favorisé leur introduction dans plusieurs produits et procédés industriels. Les récents développements en biotechnologie, en particulier dans des domaines tels que l'ingénierie des protéines et l'évolution dirigée, ont fourni des outils importants pour le développement efficace de nouvelles enzymes. Cela a abouti au développement d'enzymes aux propriétés améliorées pour des applications techniques établies et à la production de nouvelles enzymes hautement stables pour des domaines d'application entièrement nouveaux où ces dernières n'étaient pas utilisées auparavant.

En vue de l'importance des microorganismes thermophiles et leur capacité à résister aux conditions extrêmes, notre thématique ouvre des perspectives diverses:

- ✚ Il nous serait intéressant à l'avenir d'exploiter les sources thermales en Algérie afin de procéder à l'isolement de nouveaux microorganismes thermophiles qui y vivent et leur identification dans le but de caractériser leurs activités biologiques.
- ✚ Faire un criblage enzymatique des souches isolées afin de sélectionner les souches performantes pour la production d'enzymes thermostables.
- ✚ Exploiter la biodiversité des microorganismes thermophiles par des méthodes culturales et non culturales.
- ✚ Caractériser de nouveaux gènes avec un haut rendement, les cloner pour produire des enzymes recombinantes afin d'augmenter la production industrielle.



Références bibliographiques

A

- **Aanniz, T., Ouadghiri, M., Melloul, M., Swing, J., Elfahim, E., Ibijbijben, J., Ismaili, M., Ammar, M. (2015).** Thermophilic bacteria in Moroccan hot springs, salt marshes, and desert soils. *Brazilian Journal of Microbiology*, **46**(2), 443-453.
- **Alain, K., Geslin, C., Godfroy, A., Prieur, D. (2010).** Les thermophiles. [En ligne] https://wwz.ifremer.fr/content/download/12612/file/fiche_big2010_thermophiles
- **Allala, F., Bouacem, K., Boucherba, N., Azzouz, Z., Mechri, S., Sahnoun, M., Benallaoua, S., Hacene, H., Jaouadi, B., Bouanane-Darenfed, A. (2019).** Purification, biochemical, and molecular characterization of a novel extracellular thermostable and alkaline α -amylase from *Tepidimonas fonticaldi* strain HB23. *International Journal of Biological Macromolecules*, **132**, 558-574.
- **Allala, F., Bouacem, K., Boucherba, N., Mechri, S., Kriaa, M., Arkoub-Djoudi, W., Azzouz, Z., Benallaoua, S., Hacene, H., Jaouadi, B., Bouanane-Darenfed, A. (2020).** α -Amylase production by *Tepidimonas fonticaldi* strain HB23: statistical optimization and compatibility study for use in detergent formulations. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**(29), 37164-37172.
- **Aliabadi, N., Aminzadeh, S., Karkhane, A.A., Haghbeen, K. (2016).** Thermostable chitinase from *Cohnella* sp. A01: isolation and product optimization. *Brazilian Journal of Microbiology*, **47**(4), 931-940.
- **Antranikian, G. (2008).** Industrial relevance of thermophiles and their enzymes. Thermophiles: Biology and technology at High Temperatures, *CRC Press*, 368p.

B

- **Banerjee, U.C., Sani, R.K., Azmi, W., Soni, R. (1999).** Thermostable alkaline protease from *Bacillus brevis* and its characterization as a laundry detergent additive. *Process Biochemistry*, **35**(1-2), 213-219.
- **Bhosale, S.H., Rao, M.B., Deshpande, V.V. (1996).** Molecular and industrial aspects of glucose isomerase. *Microbiological Reviews*, **60**(2), 280-300.
- **Bouacem, K., Bouanane-Darenfed, A., Boucherba, N., Joseph, M., Gagaoua, M., Ben Hania, W., Kecha, M., Benallaoua, S., Hacène, H., Ollivier, B., Fardeau, M-L. (2014).** Partial characterization of xylanase produced by *Caldicoprobacter algeriensis*, a new thermophilic anaerobic bacterium isolated from an Algerian hot spring. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **174**(5), 1969-1981.
- **Bouacem, K., Bouanane-Darenfed, A., Jaouadi, N.Z., Joseph, M., Hacene, H., Ollivier, B., Fardeau, M-L., Bejar, S., Jaouadi, B. (2016).** Novel serine keratinase from *Caldicoprobacter algeriensis* exhibiting outstanding hide dehairing abilities. *International Journal of Biological Macromolecules*, **86**, 321-328

Références bibliographiques

- **Bouacem, K., Bouanane-Darenfed, A., Laribi-Habchi, H., Ben Elhoul, M., Hmida-Sayari, A., Hacene, H., Ollivier, B., Fardeau, M-L., Jaouadi, B., Bejar, S. (2015).** Biochemical characterization of a detergent-stable serine alkaline protease from *Caldicoprobacter guelmensis*. *International Journal of Biological Macromolecules*, **81**, 299-307.
- **Bouacem, K., Laribi-Habchi, H., Mechri, S., Hacene, H., Jaouadi, B., Bouanane-Darenfed, A. (2018).** Biochemical characterization of a novel thermostable chitinase from *Hydrogenophilus hirschii* strain KB-DZ44. *International Journal of Biological Macromolecules*, **106**, 338-350.
- **Bredberg, K., Persson, J., Christiansson, M., Stenberg, B., Holst, O. (2001).** Anaerobic desulfurization of ground rubber with the thermophilic archaeon *Pyrococcus furiosus* – a new method for rubber recycling. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **55**, 43-48.
- **Brown, S.H., Sjöholm, C., Kelley, R.M. (1993).** Purification and characterization of a highly thermostable glucose isomerase produced by the extremely thermophilic eubacterium, *Thermotoga maritima*. *Biotechnology and Bioengineering*, **41**(9), 878-886.
- **Bruins, M.E., Janssen, A.E.M., Boom, R.M. (2001).** Thermozyms and their applications. A review of recent literature and patents, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **90**, 155p.
- **Byrne, N. (2008).** Etude de la diversité métabolique des microorganismes des sources hydrothermales océaniques. Thèse de doctorat, Ecole Doctorale des Sciences de la Mer, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France, 206p.

C

- **Capdepu, M. et Canellas, J. (1995).** La flore bactérienne des eaux thermales et minérales. *La Houille blanche*. N° 2-3, 70-72.
- **Cobucci-Ponzano, B., Strazzulli, A., Rossi, M., Moracci, M. (2011).** Glycosynthases in Biocatalysis. *Advanced Synthesis & Catalysis*, **353**(13), 2284-2300.

D

- **Dos Santos, Y.Q., De Veras, B.O., De França, A.F.J., Gorlach-Lira, K., Velasques, J., Migliolo, L., Dos Santos, E.A. (2018).** A New Salt-Tolerant Thermostable Cellulase from a Marine *Bacillus* sp. Strain. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, **28**(7), 1078-1085.

F

- **Fardeau, M-L., Salinas, M.B., L'Haridon, S., Jeanthon, C., Verhe, F., Cayol, J-L., Patel, B.K.C., Garcia, J-L., Ollivier, B. (2004).** Isolation from oil reservoirs of novel thermophilic anaerobes phylogenetically related to *Thermoanaerobacter subterraneus*: reassignment of *T. subterraneus*, *Thermoanaerobacter yonseiensis*, *Thermoanaerobacter tengcongensis* and *Carboxydibrachium pacificum* to *Caldanaerobacter subterraneus* gen. nov., sp. nov., comb. nov. as four novel subspecies. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, **54**(2), 467-474.
- **Ferrera, I. et Reysenbach, A.L. (2007).** Thermophiles. *Encyclopedia of life sciences*, 1-9.
- **Ferris, M.J., Ruffroberts, A.L., Kopczynski, E.D., Bateson, M.M., Ward, D.M. (1996).** Enrichment culture and microscopy conceal diverse thermophilic *Synechococcus* populations in a single hot spring microbial mat habitat. *Applied and Environmental Microbiology*, **62**, 1045-1050.

G

- **Grégoire, P., Fardeau, M.L., Guasco, S., Bouanane, A., Michotey, V., Bonin, P., Dubourg, K., Cambar, J., Ollivier, B. (2009).** Les microorganismes de l'extrême. *La Presse thermique et climatique*, **146**, 49-61.
- **Ghazala, I., Sayari, N., Ben Romdhane, M., Ellouz-Chaabouni, S., Haddar, A. (2015).** Assessment of pectinase production by *Bacillus mojavensis* I4 using an economical substrate and its potential application in oil sesame extraction. *Journal of Food Science and Technology*, **52**(12), 7710-7722.
- **Guézennec, J. (2004).** Les bactéries des sources hydrothermales profondes à l'origine de nouvelles molécules bioactives. *Vertig O la revue électronique en science de l'environnement*, **5**(3).
- **Guézennec, J., Rocchiccioli, F., Maccaron-Gomez, B., Khelifa, N., Dussauze, J., Rimbault, A. (1998).** Occurrence of 3-hydroxyalkanoic acids in sediments from the Guaymas basin (Gulf of California). *FEMS Microbiology Ecology*, **26**(4), 335-344.

H

- **Holden, J.F. (2009).** Extremophiles: Hot Environments. *Encyclopedia of Microbiology*, 3rd Edition, 127-146.
- **Hupé, J-F. (2008).** Enrichissement et recherche de certaines activités enzymatiques produites par des bactéries aérobies thermophiles. Mémoire, INRS-Institut Armand-Frappier, Université du Québec, Canada, 175p.

J

- **José-Miguel, C.E.I., Valerio, S., Petrovich, I., Gerasimo, V., Denys, C.J., Aklano, G., Fairbridge, R., Zullini, A., Ponnam-Peruma, C., Leonardi, C. (1989).** La nature: Grottes, Geysers et Glaciers. **8**, 139-141.

K

- **Kádár, Z., Vrije, T.D., Budde, M.A.W., Szengyel, Z., Réczey, K., Claassen, P.A.M. (2003).** Hydrogen Production from Paper Sludge Hydrolysate. *Applied Biochemistry and Biotechnology, Biotechnology for Fuels and Chemicals*, 557-566.
- **Kaki, H.G. (2016).** File: Hammam Debagh حمام دباغ 04.jpg. *Wikimedia Commons*. [En ligne] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hammam_Debagh_%D8%AD%D9%85%D8%A7%D9%85_%D8%AF%D8%A8%D8%A7%D8%BA_04.jpg
- **Kashyap, D.R., Vohra, P.K., Chopra, S., Tewari, R. (2001).** Applications of pectinases in the commercial sector. *Bioresource Technology*, **77**(3), 215-227.
- **Kublanov, I.V., Prokofeva, M.I., Kostrikina, N.A., Kolganova, T.V., Tourova, T.P., Wiegel, J., Bonch-Osmolovskaya, E.A. (2007).** *Thermoanaerobacterium aciditolerans* sp. nov., a moderate thermoacidophile from a Kamchatka hot spring. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, **57**(2), 260-264.

L

- **Laycock, B., Halley, P., Pratt, S., Werker, A., Lant, P. (2013).** The chemomechanical properties of microbial polyhydroxyalkanoates. *Progress in Polymer Science*, **38**(3), 536-583.
- **Lee, C.Y. et Zeikus, J.G. (1991).** Purification and characterization of thermostable glucose isomerase from *Clostridium thermosulfurogenes* and *Thermoanaerobacter* strain B6A. *Biochemical Journal*, **273**(3), 565–571.
- **Lund, E. et John, W. (2007).** Characteristics, development and utilization of geothermal resources. *Geothermal Heat Center Bulletin*, 9p.

M

- **Madigan, M. et Martinko, J. (2007).** Brock Biologie des microorganismes. 11^{ème} édition, *Pearson Education*, 1047p.
- **Madigan, M.T., Martinko, J.M., Stahl, D.A., Clark, D.P. (2010).** Brock biology of microorganisms. *Pearson Education*, **18**, 577-780.
- **Mathis, B., Marshall, C., Milliken, C., Makkar, R., Creager, S., May, H. (2008).** Electricity generation by thermophilic microorganisms from marine sediment. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **78**(1), 147-155.

- **Mechri, S., Bouacem, K., Jabeur, F., Mohamed, S., Ammara, A.N., Dab, A., Bouraoui, A., Bouanane-Darenfed, A., Bejar, S., Hacène, H., Baciou, L., Lederer, F., Jaouadi, B. (2019).** Purification and biochemical characterization of a novel thermostable and halotolerant subtilisin SAPN, a serine protease from *Melghiribacillus thermohalophilus* Nari2A^T for chitin extraction from crab and shrimp shell by-products. *Extremophiles*, **23**(5), 529-547.
- **Mechri, S., Sellem, I., Bouacem, K., Jabeur, F., Laribi-Habchi, H., Mellouli, L., Hacène, H., Bouanane-Darenfed, A., Jaouadi, B. (2020).** A biological clean processing approach for the valorization of speckled shrimp *Metapenaeus monoceros* by-product as a source of bioactive compounds. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**(13), 15842-15855.
- **Mhiri, S., Bouanane-Darenfed, A., Jemli, S., Neifar, S., Ameri, R., Mezghani, M., Bouacem, K., Jaouadi, B., Bejar, S. (2020).** A thermophilic and thermostable xylanase from *Caldicoprobacter algeriensis*: Recombinant expression, characterization and application in paper biobleaching. *International Journal of Biological Macromolecules*, **164**, 808-817.
- **Minic, Z., Serre, V., Hervé, G. (2006).** Adaptation des organismes aux conditions extrêmes des sources hydrothermales marines profondes. *Comptes rendus biologiques*, **329**(7), 527-540.
- **Moharana, T.R., Pal, B., Rao, N.M. (2019).** X-ray structure and characterization of a thermostable lipase from *Geobacillus thermoleovorans*. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, **508**(1), 145-151.
- **Mu, W., Wang, X., Xue, Q., Jiang, B., Zhang, T., Miao, M. (2012).** Characterization of a thermostable glucose isomerase with an acidic pH optimum from *Acidothermus cellulolyticus*. *Food Research International*, **47**(2), 364-367.

N

- **Nakagawa, S., Shtaih, Z., Banta, A. (2005).** *Sulfurihydrogenibium yellowstonense* sp. nov., an extremely thermophilic, facultatively heterotrophic, sulfur-oxidizing bacterium from Yellowstone National Park and amended descriptions of the genus *Sulfurihydrogenibium*, *S. subterraneum*, and *S. azorense*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, **55**(6), 2263-2268.
- **Neifar, S., Ben Hlima, H., Mhiri, S., Mezghani, M., Bouacem, K., Hadj Ibrahim, A., Jaouadi, B., Bouanane-Darenfed, A., Bejar, S. (2019).** A novel thermostable and efficient Class II glucose isomerase from the thermophilic *Caldicoprobacter algeriensis*: Biochemical characterization, molecular investigation, and application in High Fructose Syrup production. *International Journal of Biological Macromolecules*, **129**, 31-40.

Références bibliographiques

- **Niehaus, F., Bertoldo, C., Kähler, M., Antranikian, G. (1999).** Extremophiles as a source of novel enzymes for industrial application. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **51**, 711-729.
- **Nshimiyimana, J.B., Khadka, S., Mwizerwa1, E.M., Akimana1, N., Adhikari, S., Nsabimana, A. (2018).** Thermophiles: Isolation, characterization and screening for enzymatic activity. *Bioscience Discovery*, **9**(3), 430-437.

O

- **Ouali, S. (2008).** Les sources Thermales en Algérie. Division Energie Solaire Thermique et géothermie, *Recherche et Développement*, 16-18.

P

- **Potprommanee, L., Wang, X.Q., Han, Y.J., Nyobe, D., Peng, Y.P., Huang, Q., Liu, J.Y., Liao, Y.L., Chang, K.L. (2017).** Characterization of a thermophilic cellulase from *Geobacillus* sp. HTA426, an efficient cellulase-producer on alkali pretreated of lignocellulosic biomass. *PLoS One*, **12**(4), e0175004.
- **Prakash, O. et Jaiswal, N. (2010).** α -Amylase: An Ideal Representative of Thermostable Enzymes. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **160**, 2401-2414.

Q

- **Quérellou, J. et Guézennec, J. (2010).** Biotechnologie des extrêmophiles. *Techniques de l'Ingénieur*, 1-13.

R

- **Rigoldi, F., Donini, S., Redaelli, A., Parisini, E., Gautieri, A. (2018).** Review: Engineering of thermostable enzymes for industrial applications. *APL Bioengineering*, **2**(1), 011501.

S

- **Saibi, H. (2009).** Geothermal resources in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(9), 2544-2552.
- **Santos, H., Lamosa, P., Borges, N., Gonçalves, L.G., Pais, T., Rodrigues, M.V. (2011).** Organic compatible solutes of prokaryotes that thrive in hot environments: the importance of ionic compounds for thermostabilization. *Extremophiles Handbook*, 497-520.
- **Schlegel, H.G. et Jannasch, H.W. (2006).** Prokaryotes and their habitats. *The Prokaryotes*, 137-184.
- **Schoeller, H. (1962).** Les eaux souterraines, hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Eaux souterraines [273].

Références bibliographiques

- **Shabih, F., Amir, H., Muhammad, N., Temoor, A., Muhammad, S., Mohsin, T., Imran, S., Romana, T. (2018).** Lignocellulosic Biomass: A Sustainable Bioenergy Source for the Future. *Protein & Peptide Letters*, **25**(2), 148-163.
- **Sharma, R., Thakur, V., Sharma, M., Birkeland, N.K. (2013).** Biocatalysis Through Thermostable Lipases: Adding Flavor to Chemistry. *Thermophilic Microbes in Environmental and Industrial Biotechnology*, 905-927.
- **Sharma, S., Vaid, S., Bhat, B., Singh, S., Bajaj, B.K. (2019).** Thermostable Enzymes for Industrial Biotechnology. Biomass, Biofuels, Biochemicals. *Advances in Enzyme Technology*, 469-495.
- **Simon-Colin, C., Raguénès, G., Cozien, J., Guézennec, J. (2008).** *Halomas profundus* sp. nov., a new PHA-producing bacterium isolated from a deep-sea hydrothermal vent shrimp. *Journal of Applied Microbiology*, **104**(5), 1425-1432.
- **Sinha, R. et Khare, S.K. (2013).** Characterization of detergent compatible protease of a halophilic *Bacillus* sp. EMB9: Differential role of metal ions in stability and activity. *Bioresource Technology*, **145**, 357-361.
- **Sürücü, G. (1999).** Growth requirements of thermophilic aerobic microorganisms in mixed cultures for the treatment of strong wastes. *Water Science and Technology*, **40**(1), 53-60.
- **Susanti, D., Johnson, E.F., Lapidus, A., Han, J., Reddy, T., Pilay, M., Ivanova, N.N., Markowitz, V.M., Woyke, T., Kyrpides, N.C. (2016).** Permanent draft genome sequence of *Desulfurococcus mobilis* type strain DSM 2161, a thermoacidophilic sulfur-reducing crenarchaeon isolated from acidic hot springs of Hveravellir, Iceland. *Standards in Genomic Sciences*, **11**(1), 3.

T

- **Tomova, I., Dimitrova, D., Stoilova-Disheva, M., Lyutskanova, D., Kambourova, M. (2011).** Archaeal diversity at two hot springs, Rupi Basin, Bulgaria. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, **25**(1), 105-113.

U

- **Urbietá, M.S., Donati, E.R., Chan, K-G., Shahar, S., Sin, L.L., Goh, K.M. (2015).** Thermophiles in the genomic era: Biodiversity, science, and applications. *Biotechnology Advances*, **33**(6), 633-647.
- **Urios, L., Cueff, V., Pignet, P., Barbier, G. (2004).** *Tepidibacter formicigenes* sp. nov., a novel sporeforming bacterium isolated from a Mid- Atlantic Ridge hydrothermal vent. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, **54**(2), 439-443.

Références bibliographiques

- **Utturkar, S.M., Huber, H., Leptihn, S., Loh, B., Brown, S.D., Stetter, K.O., Podar, M. (2016).** Draft genome sequence of *Pyrodictium occultum* PL19^T, a marine hyperthermophilic species of Archaea that grows optimally at 105°C. *Genome Announcements*, **4**(1), e00016-16.

V

- **Valeriani, F., Protano, C., Gianfranceschi, G., Leoni, E., Galasso, V., Mucci, N., Vitali, M., Romano Spica, V. (2018).** Microflora Thermarum Atlas project: biodiversity in thermal spring waters and natural SPA pools. *Water Supply*, **18**(4), 1472-1483.
- **Vieille, C. et Zeikus, G.J. (2001).** Hyperthermophilic enzymes: sources, uses, and molecular mechanisms for thermostability. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 1-43.

Y

- **Yamada, C., Sawano, K., Iwase, N., Matsuoka, M., Arakawa, T., Nishida, S., Fushinobu, S. (2017).** Isolation and characterization of a thermostable lipase from *Bacillus thermoamylovorans* NB501. *The Journal of General and Applied Microbiology*, **62**(6), 313-319.
- **Yu, P. et Xu, C. (2018).** Production optimization, purification and characterization of a heat-tolerant acidic pectinase from *Bacillus* sp. ZJ1407. *International Journal of Biological Macromolecules*, **108**, 972-980.

Z

- **Zarafeta, D., Kissas, D., Sayer, C., Gudbergdottir, S.R., Ladoukakis, E., Isupov, M.N., Chatziioannou, A., Peng, X., Littlechild, J.A., Skretas, G., Kolisis, F.N. (2016).** Discovery and Characterization of a Thermostable and Highly Halotolerant GH5 Cellulase from an Icelandic Hot Spring Isolate. *PLoS One*, **11**(1), e0146454.

Sites Web

- [1] **Anonyme. (2018).** [En ligne] <http://www.aps.dz/economie/81022-mobilisation-de-12-milliards-da-pour-l-amenagement-de-8-stations-thermales>
- [2] **Figure 1 (A):** [En ligne] https://fr.123rf.com/photo_50256799_beppu-japon-%C3%A0-la-mer-quot-hell-quot-source-d-eau-chaude-ainsi-nomm%C3%A9-pour-son-eau-bleu-.html
- [3] **Figure 1 (B):** [En ligne] https://es.wikipedia.org/wiki/Fuente_hidrotermal
- [4] **Figure 1 (C):** [En ligne] <https://englishosaca.wordpress.com/eight-grade/yellowstones-hot-secret/yellowstone-lake-and-caldera/>
- [5] **Figure 1 (D):** [En ligne] <https://www.voyage.fr/boussole-et-sac-dos/les-plus-beaux-geysers-dislande>

- [6] **Figure 2 (A):** [En ligne] <https://www.flickr.com/photos/nabiln73/5845460443>
- [7] **Figure 2 (B):** [En ligne] <https://img.itinari.com/pages/images/original/5d5fbe0c-068f-49b3-8cf3-548ebdc17f22-istock-527027958.jpg?ch=DPR&dpr=1&w=1200&h=800&s=29764af80dd946fec6bb83167cec4486>
- [8] **Figure 2 (C):** [En ligne] https://voyages.michelin.fr/sites/default/files/styles/background_poi_header/public/istock-534713549-2.jpg?itok=3V-Q-W8S
- [9] **Figure 2 (D):** [En ligne] <https://img.ev.mu/images/zooms/656/440x290/3.jpg>
- [10] **Anonyme. (2010).** Classification des eaux thermales. [En ligne] <http://hammam-righa.over-blog.com/article-classification-des-eaux-thermales-54876675.html>
- [11] **Anonyme. (2014).** Les eaux minérales. [En ligne] https://www.doctissimo.fr/html/forme/rem_forme/thermalisme/fo_2326_eaux_therm.htm
- [12] **Anonyme. (2020).** Les eaux médicinales. [En ligne] <https://www.balnearios.org/fr/les-eaux-medicinales>
- [13] **Anonyme. (2019).** Les eaux thermales ont des vertus et des caractéristiques différentes. [En ligne] <https://www.ladepeche.fr/2019/03/25/les-eaux-thermales-ont-des-vertus-et-des-caracteristiques-differentes,8089685.php>

Résumé

La biodiversité des microorganismes thermophiles se développant dans les environnements chauds, est d'une importance capitale. Les études phylogénétiques basées sur l'analyse de l'ARN ribosomal ont permis de les classer dans les deux domaines de la vie regroupant les procaryotes « *Bacteria* et *Archaea* », plus précisément, dans les branches les plus profondes de l'arbre phylogénétique du vivant. En effet, ces microorganismes ont pu développer différentes stratégies moléculaires leur permettant de coloniser les milieux extrêmes. Ainsi, leur capacité à produire de biomolécules notamment des enzymes hautement stables, pousse les biotechnologues à s'intéresser intensivement à ce groupe de microorganismes. Aussi de procéder à leur isolement afin de caractériser leurs activités biologiques et de sélectionner les souches les plus performantes produisant des enzymes thermostables trouvant ensuite des applications innovantes dans les divers procédés industriels se déroulant à haute température.

Cette étude bibliographique met l'accent sur les environnements chauds, plus particulièrement les sources thermales dans le monde et en Algérie. L'attention sera mise également sur les microorganismes thermophiles, leurs caractéristiques, leurs mécanismes d'adaptation aux températures élevées, ainsi leurs enzymes thermostables et leurs applications biotechnologiques.

Mots clés: Environnements chauds, Sources thermales, Thermophiles, Mécanismes d'adaptation, Enzymes thermostables, Applications biotechnologiques.

Abstract

The biodiversity of thermophilic microorganisms that thrive in hot environments is of utmost importance. Phylogenetic studies based on the analysis of ribosomal RNA have made it possible to classify them in the two domains of life grouping together the prokaryotes "*Bacteria* and *Archaea*", more precisely, in the deepest branches of the phylogenetic tree of life. Indeed, these microorganisms have been able to develop different molecular strategies allowing them to colonize extreme environments. Thus, their ability to produce biomolecules, in particular highly stable enzymes, is driving biotechnologists to take an intensive interest in this group of microorganisms. Also to proceed with their isolation in order to characterize their biological activities and to select the most efficient strains producing thermostable enzymes then finding innovative applications in the various industrial processes taking place at high temperature.

This bibliographic study focuses on hot environments, more specifically thermal springs around the world and in Algeria. Attention will also be paid to thermophilic microorganisms, their characteristics, their adaptation mechanisms to high temperatures, as well as their thermostable enzymes and their biotechnological applications.

Key words: Hot environments, Thermal springs, Thermophiles, Adaptation mechanisms, Thermostable enzymes, Biotechnological applications.