



لجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université des Frères Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة الاخوة منتوري قسنطينة
كلية علوم الطبيعة والحياة

قسم الميكروبيولوجيا
Département Microbiologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Science biologiques

Spécialité : Mycologie et Biotechnologie Fongique

Intitulé :

IMPACT DE LA PROLIFÉRATION DES MYCETES SUR MATERIAUX DE

Présenté et soutenu par : BOUDEBZA Amira

Le : 30/09/2020

ZAIMECHE Imene Ikrame

Jury d'évaluation :

Président du jury : Mlle. BOUCHLOUKH Warda

(MAA. UFM. Constantine)

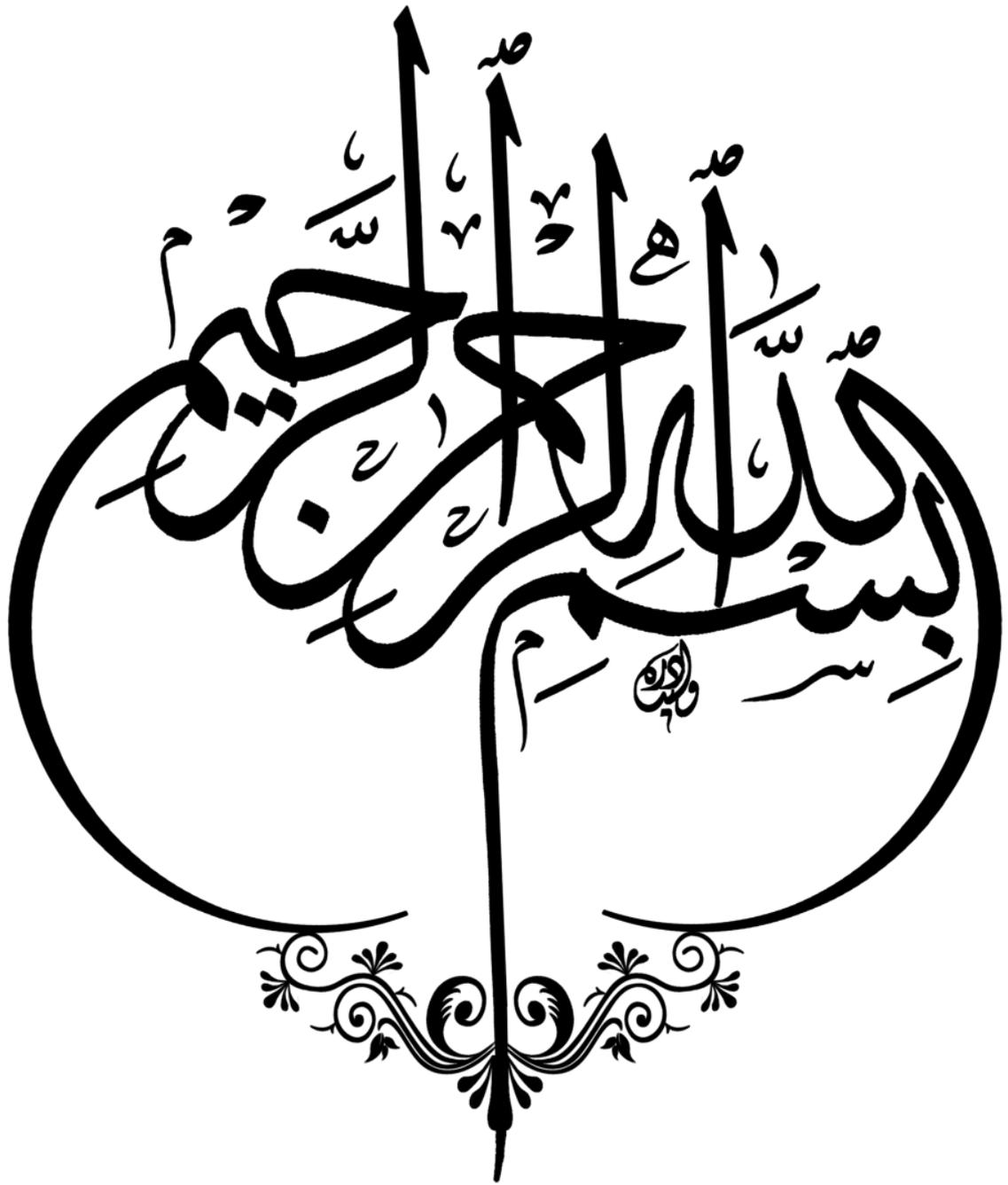
Encadreur : Mme. MERGOUD Lilia

(MAA. UFM. Constantine)

Examineur : Mme. ALMI Hiba

(MCB. UFM. Constantine)

***Année universitaire
2019- 2020***



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier **Dieu** tout puissant, qui en son nom et avec sa protection, nous avons réussi à réaliser ce travail.

Nous tenons aussi à présenter nos vifs remerciements et notre respect au Jury pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de juger ce mémoire :

Mme Bouchloukh. En tant que président du jury

Mme Almi Hiba. En tant qu'examinatrice

Nos profonds remerciements et notre gratitude s'adressent à notre encadreur **Mme Mergoud Lilia** pour sa précieuse aide, ses orientations et le temps qu'elle nous a accordé pour notre encadrement.

Nous remercions également l'ensemble du personnel du laboratoire De Microbiologie et de Zoologie.

Nos sentiments de reconnaissance et nos remerciements vont également à l'ensemble de tous nos enseignants qui ont contribué dans notre formation de long de notre parcours pédagogique.

Nous spécifions ceux qui nous ont dirigé et encadré principalement en master.

Merci

Dédicaces

Je remercie, tout d'abord, **Dieu** tout puissant de m'avoir donné la force et le courage pour accomplir ce modeste travail que je dédie :

A **ma chère maman** que j'aime tant, sans laquelle je ne serai jamais

Arrivée là où j'en suis.

A **mon cher mari** pour tout cet encouragement et mes charmantes sœurs

Amani, Amel, Manar

et toute **ma famille**.

A **mes enseignants** ainsi qu'à tous **les étudiants** de ma promotion.

A tous ceux que j'aime.

Amira

Dédicaces

Je remercie, tout d'abord, **Dieu** tout puissant, pour m'avoir guidé vers un avenir incha'allah prometteur et de m'avoir donné la force et le courage pour accomplir ce travail que je dédie :

A **mes chers parents** pour leur encouragement et leur soutien moral.

A ma belle-sœur **Maria** et mon frère unique **Oussama** et à toute **ma famille**.

A mes belles amies **Hadjer, Rania, Soundous**.

A tous **mes amis** et tous ceux qui j'aime.

Imene Ikrame

Aw: Activité de l'eau.

YES: (Yeast Extract Sucrose)

pH: potentiel d'Hydrogène.

UV: Ultra-violet.

PICADA: Photocatalytic Innovative Covering Applications for De –
pollution Assessment.

ARN : L'acide ribonucléique.

DGGE : Denaturing Gradient Gel Electrophoresis.

SSCP : Single Strand Conformational Polymorphism .

DAPI : (4',6 – diamino -2- phenyllindole).

SAA : Spectrométrie d'absorption atomique.

ICP : spectroscopie d'émission atomique par plasma.

SFX : Spectrométrie de fluorescence.

EDS : Dispersion d'énergie.

ATG : Analyse thermogravimétrique.

ADT : Analyse thermique différentielle.

AED : Analyse enthalpique différentielle.

MEB : Microscope Électronique à Balayage.

ATD : Analyse thermique différentielle.

TG : Thermo – Gravimétrique.

Glossaires

DSC : Differential Scanning Calorimetry : est une technique d'analyse thermique.

DRX : Cristallographie au Rayon X : technique différentielle fondée sur la diffraction des rayons X.

TiO₂ : Le dioxyde de titane : c'est un composé d'oxygène et de titane présent dans la nature et fabriqué industriellement.

ADNr : L'ADN ribosomique : est l'ensemble des séquences d'ADN transcrites en ARN ribosomique ARNr.

ADN : Acide désoxyribonucléique : est une macromolécule biologique présente dans toutes les cellules.

ARN 16s : L'ARN ribosomique 16s est l'ARN ribosomique constituant la petite sous – unités des ribosomes des procaryotes.

EPS : Substances Polymériques Extracellulaires : ce sont les protéines, les glycoprotéines, les glucides et les substances humiques.

ATP : Adénosine Tri – Phosphate : c'est une molécule dont la dégradation libère beaucoup d'énergie, récupéré pour le fonctionnement de nombreuses réactions chimiques.

CSTB : Le centre scientifique et technique du bâtiment : c'est un établissement public français à caractère industriel et commercial.

Les champignons méristématiques : Une cellule méristématique est une cellule non différenciée qui est apte à se diviser. La croissance méristématique se fait par gonflement de la cellule initiale qui donne naissance à deux nouvelles cellules, qui peuvent à leur tour se diviser.

Liste des abréviations

Biomasse : masse totale (quantité de matière) de toutes les espèces vivantes présentes en un milieu donné.

Microbe : vient du grec *mikros*=petit, et *bios*=vie. Ce mot désigne tous les micro-organismes visibles au microscope comme les bactéries, les champignons, ou plus petit encore comme les virus. Dans le langage familier, se dit de tout micro-organisme pathogène.

Abiotique : qualifie un milieu où la vie n'existe pas, ou dans lequel la vie est impossible.

Hyphes : vient du grec *hyphe* = tissu, filaments longs, fins et ramifiés à structure cellulaire qui constituent les mycètes.

Ubiquiste : se dit des espèces susceptibles d'être observées dans de très nombreux habitats.

Eutrophique : se dit d'un milieu qui se retrouve enrichie en éléments nutritifs.

Phialide: article mycélien fertile en forme de bouteille formant successivement des spores.

Liste des figures

N°	Intitulé	P
1	Différents types d'horizons d'un profil de sol.....	7
2	Ciment.....	8
3	Béton.....	10
4	Structure d'un hyphe et son développement vers la formation d'un mycélium ; hyphe coenocytique, hyphe cloisonne.....	15
5	Stade du cycle vital.....	17
6	Quelques champignons filamenteux.....	18
7	Schéma de la reproduction des moisissures.....	20
8	Cycle de vie des moisissures.....	21
9	Schéma de la structure d'un <i>Penicillium</i> à gauche et de celle d'un <i>Aspergillus</i> à droite.....	22
10	Aspect micro et macroscopique d' <i>Aspergillus niger</i>	28
11	Aspect micro et macroscopique d' <i>Alternaria alternata</i>	29
12	Méthodologie schématique pour l'étude microbiologique de la biodétérioration selon les techniques d'échantillonnage.....	33
13	Représentation schématique du système considéré pour l'étude de la biodétérioration.....	38

Liste des tableaux

N°	Intitulé	P
1	Notation cimentière des principaux constituants du ciment.....	9
2	Exemples de mycotoxines produites par certaines moisissures...	26

Introduction.....

Chapitre I : Matériaux de construction

1. Biodétérioration..... 5

2. Matériaux de construction altérés par les mycètes..... 5

2.1. Formation du sol..... 6

2.2. Autres Matériaux de construction..... 8

3. Les facteurs influençant la biodétérioration..... 10

3.1. Bioréceptivité..... 11

Chapitre II : Généralités sur les mycètes

1. Classification..... 15

2. Mode de reproduction..... 19

3. Cycle de vie..... 20

4. Identification des champignons..... 22

5. Facteurs de développement..... 23

6. Métabolites secondaires et mycotoxines..... 25

7. Les micromycètes impliqués dans la biodétérioration..... 27

Chapitre III : Techniques d'analyse et de lutte contre moisissures

1. Techniques d'analyse et de caractérisation des moisissures..... 32

1.1. Les techniques biologiques..... 32

1.2. Analyses physiques et chimiques..... 36

1.3. Exemples d'application..... 39

2. Les outils actuels de lutte contre la prolifération des moisissures sur le matériel constructif..... 40

2.1. Nettoyage..... 40

2.2. Méthodes chimiques.....	40
2.3. Méthodes phtisiques.....	41
Conclusion.....	43
Résumé.....	45
Abstract.....	46
ملخص.....	47
Références bibliographique.....	49

Introduction

Les bâtiments, les monuments, les ouvrages d'art etc. ont pour vocation de durer dans le temps. Au fil des années, ils sont exposés au vieillissement naturel dû à la pollution environnementale, au gel, au vent, à la pluie etc. mais ils sont également soumis aux attaques biologiques. Les micro-organismes ont la capacité de se développer sur la surface des matériaux de construction, organiques ou inorganiques.

L'impact microbien sur ces matériaux a une influence non négligeable sur leur durabilité et leurs propriétés, allant de l'altération de l'aspect esthétique jusqu'à la diminution de leur durée de vie : on parle alors de « **biodétérioration** ». Selon la définition donnée par Eggins et Oxley (2001) le mot détérioration implique la perte de la valeur économique, et présente donc un caractère plutôt négatif. Le coût de la biodétérioration des matériaux de construction est difficile à estimer. Cela inclut aussi bien le coût économique des opérations de nettoyage, de peinture et de réfection que du coût culturel causé par la détérioration du patrimoine historique.

Dans certains cas, on trouve aussi le terme « **biodégradation** ». Biologiquement, c'est exactement le même processus que la biodétérioration, mais la biodégradation présente un caractère plutôt positif dans le sens où le résultat est souhaité. (WIKTOR, 2008)

Généralement, tous les types de micro-organismes – bactéries, cyanobactéries, algues, champignons – sont capables d'attaquer et de dégrader les matériaux de construction. Plusieurs groupes microbiens coexistent en même temps, sur un même matériau.

Toute biodétérioration qui se produit est probablement le résultat d'interactions microbiennes complexes (WIKTOR, 2008)

Les champignons (mycètes) peuvent être considérés comme les organismes associés à la biodétérioration des matériaux organiques et inorganiques les mieux armés. Ils sont omniprésents et attaquent une grande variété de substrats, tels que le textile, le cuir, le papier, les pierres, le bois, le plastique, la peinture, les matériaux de construction etc. Ils sont capables de pénétrer à l'intérieur du matériau par la croissance des hyphes et par une activité corrosive, due à l'excrétion d'acides organiques ou à l'oxydation de composés de la matrice. Leur activité de détérioration inclut la décoloration de la surface des matériaux, par l'excrétion de mélanine par les champignons **(WIKTOR, 2008)**

Dans ce contexte, l'objectif de notre travail est la recherche des isolas correspond à la prolifération de matériaux de construction.

En effet, le travail s'articule sur :

- Caractérisation et d'identification les flores fongiques présentes sur les matériaux de construction.
- Détermination de quelques méthodes de prélèvement et d'analyse par différents techniques (Physiques, chimiques et biologie moléculaire) des flores fongiques présentes sur ces matériaux.
- Enfin, une piste de maîtrise de la prolifération fongique a été initiée à travers le développement de méthodes de lutte biologique.

Chapitre I :
Matériaux
de construction

1. Biodétérioration

H. J. Hueck définit dès 1965 **la biodétérioration** comme étant « tout changement indésirable dans les propriétés d'un matériau causé par l'activité vitale d'organismes ». **La biodégradation** est généralement associée à « l'exploitation, par l'homme, des capacités de décomposition d'organismes pour rendre un déchet plus utile ou plus acceptable ». Eggins et Oxley (1980) tentent d'approfondir ces définitions.

Conventionnellement, **la biodétérioration** se réfère aux dommages causés aux matériaux de constructions, et processus de valeur relativement élevée tandis que **la biodégradation** se réfère seulement aux matériaux et se distingue par le traitement biologique principalement parce qu'elle s'applique aux matériaux de valeur basse ou même négative. (WIKTOR, 2008).

2. Matériaux de construction altérés par les mycètes

Les matériaux de construction étant un support de développement et prolifération des microorganismes, il est important de mieux appréhender leur comportement dans les conditions hygrothermiques (normales et accidentelles) rencontrées dans les bâtiments. De nombreuses études se sont ainsi intéressées au développement bactérien et fongique sur les matériaux conventionnels (plâtre, béton, etc.), afin d'identifier les conditions environnementales nécessaires à leur croissance sur ces supports.

Toutefois, la terre crue reste sensible à l'eau et peut être altérée lors d'intempéries, de ruissellements ou de dégâts des eaux. De plus, une des problématiques associées aux fortes humidités intérieures est le développement de microorganismes dans l'habitat. La terre crue ayant besoin d'être humidifiée pour sa mise en place, la prolifération de moisissures à la

surface de matériaux avec inclusion bistournée a déjà pu être observée. (Alexis SIMONS, 2018).

Les risques de prolifération sur les matériaux de construction à base de terre crue restent assez mal caractérisés, malgré les enjeux qu'ils représentent en termes de maintien de la qualité de l'air intérieur.

Pour bien comprendre quelles sont les propriétés de la terre utilisée dans les bâtiments et comment elle est utilisée, il faut dans un premier temps se pencher sur son origine et ses caractéristiques.(Alexis SIMONS, 2018).

2.1. Formation du sol

Le sol constitue la fraction solide de la sphère terrestre. Il existe de nombreux types de terre, issus de différents processus physiques, chimiques et/ou biologiques. Il existe à la surface de la terre différents types de roches-mères, aux caractéristiques variées : les roches-mères dures, comme le granit ou le schiste ; les roches-mères tendres ou meubles, comme la craie ou l'argile.

Ces roches sont soumises à différents phénomènes de vieillissement, causés par les effets de la pluie, du froid ou du soleil, qui altèrent la roche dont la composition chimique et minéralogique est modifiée.(Alexis SIMONS, 2018). Suite à cette première étape de désagrégation, un développement d'organismes (microorganismes, flore végétale, faune) à la surface des roches poursuit cette altération. Cette étape conduit à un enrichissement du sol en molécules organiques et modifie fortement sa composition.

Le phénomène de migration des éléments solubles par lixiviation modifie également la composition du sol. Dans le cas d'un climat humide et pluvieux, les eaux de pluie tombant sur le sol migrent par gravité et les

éléments solubles (particules argileuses, particules limoneuses, ions) sont alors emportés avec elles vers les nappes phréatiques (phénomène de lessivage). A l'inverse, si le climat est sec, les éléments solubles contenus dans le sol sont remontés par capillarité vers des couches plus élevées.

Ces différents phénomènes vont conduire à une stratification du sol, avec différentes compositions minérales et chimiques suivant la profondeur. Les différentes couches homogènes du sol sont nommées horizons, et possèdent des caractéristiques spécifiques (Figure1). L'ensemble de ces horizons forme le profil du sol, dont les couches sont plus ou moins distinctes suivant son âge. Au total, 10 horizons principaux et 7 horizons de transition entre deux strates ont été définis. Les principales catégories sont les suivantes: **Horizon O, A, E, B, C et R** (Alexis SIMONS, 2018).

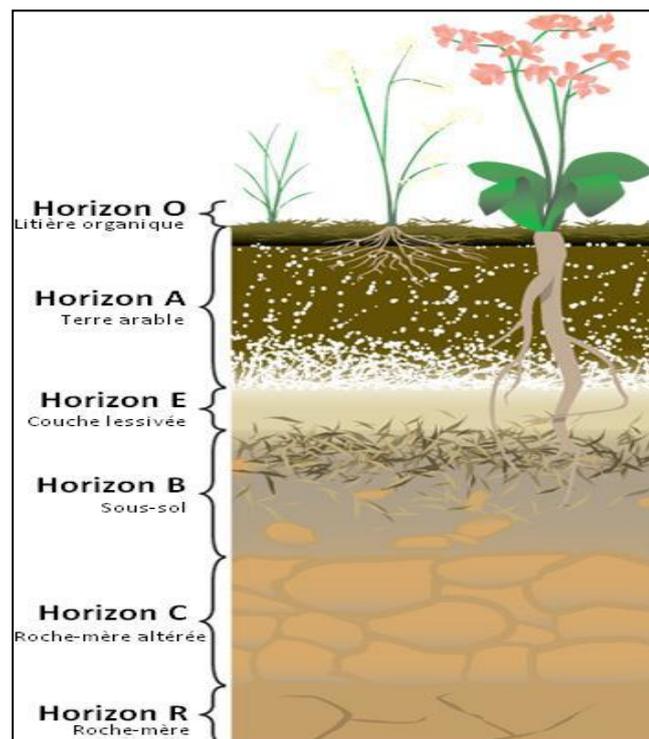


FIGURE (01) : DIFFERENTS TYPES D'HORIZONS D'UN PROFIL DE SOL

(<http://sparkcharts.sparknotes.com/genci/envsci/section3.php>).

2.2. Autres Matériaux de construction

A. Le ciment



FIGURE (02) : CIMENT. (<https://www.heidelbergcement.com/en/cement>).

Le ciment est un liant hydraulique : il a la propriété de faire prise et de durcir au contact de l'eau. L'hydratation du ciment anhydre conduit à l'obtention d'un matériau durci, poreux, saturé avec une solution interstitielle qui évolue en fonction des réactions d'hydratation. Les pâtes de ciment hydraté sont donc composées de grains anhydres et d'hydrates en équilibre avec la solution interstitielle. La porosité, qui évolue au cours du temps, va influencer les propriétés diffusives intrinsèques du matériau (**Moudilou,**

La chimie du ciment se construit essentiellement à partir de 4 oxydes majeurs : CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , présents dans les matières premières et qui vont former les silicates et les aluminates de calcium du clinker.

Pour simplifier les écritures des réactions, la notation des cimentiers a été utilisée **Tableau (01)** :

Oxydes	Notation chimique	Colonne 3
Oxyde de calcium	CaO	C
Oxyde de silicium	SiO ₂	S
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	A
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	F
Silicates		
Silicates tricalcique	(CaO) ₃ SiO ₂	C3S
Silicate bicalcique	(CaO) ₂ SiO ₂	C2S
Autres		
Aluminate tricalcique	(CaO) ₃ Al ₂ O ₃	C3A
Alumino-ferrite tetracalcique	(CaO) ₄ (Al ₂ O ₃)(Fe ₂ O ₃)	C4AF
Eau	H ₂ O	H

Gypse	$\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$	CSH2
-------	---------------------------------------	------

Tableau (01) : Notation cimentière des principaux constituants du ciment.

(WIKTOR, 2008)

B. Béton :

Le **béton** est un assemblage de matériaux de nature généralement minérale. Il met en présence des matières inertes, appelées granulats ou agrégats (graviers, sables, etc.), et un liant (ciment, bitume, argile), c'est-à-dire une matière susceptible d'en agglomérer d'autres ainsi que des adjuvants qui modifient les propriétés physiques et chimiques du mélange. Mêlés à de l'eau, on obtient une pâte, à l'homogénéité variable, qui peut, selon le matériau, être moulée en atelier (pierre artificielle), ou coulée sur chantier. Le béton fait alors « prise », c'est-à-dire qu'il se solidifie.

(<https://fr.m.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton>).



FIGURE(03) : BETON

(<https://www.linternaute.fr/bricolage/guide-maison-et-jardin/1411621-dosage-beton>).

3. Les facteurs influençant la biodétérioration

La composition du matériau utilisé et son état de conservation, les conditions environnementales et climatiques favorables (température, humidité, pluie, exposition au soleil, polluants organiques et inorganiques) peuvent créer de bonnes conditions, parfois même optimales, pour le développement des organismes sur la surface (détérioration esthétique).

Et/ou jusqu'à des couches plus profondes (Détérioration physique/mécanique et chimique). (WIKTOR, 2008).

L'estimation de la contribution biologique dans la détérioration des pierres commence par la description du type de pierre/bâtiment, y compris la présence d'eau (par exemple, humidité qui monte du sol, défauts d'écoulement de l'eau, humidité de condensation), et des nutriments (par exemple, composés organiques ou inorganiques issus de sources naturelles ou anthropogéniques).(WIKTOR, 2008).

3.1. Bioréceptivité

En 1995, Guillitte définit le concept de la bioréceptivité comme «l'aptitude d'un matériau à être colonisé par un ou plusieurs groupes d'organismes vivants sans nécessairement induire une biodétérioration». La bioréceptivité peut aussi être définie comme l'ensemble des propriétés du matériau qui contribuent à l'installation, l'accrochage, et le développement de la faune et/ou de la flore. La bioréceptivité dépend donc des propriétés intrinsèques de la matrice, telles que sa composition, la porosité, la perméabilité, ou encore la rugosité.(WIKTOR, 2008).

A. Influence de la composition de la matrice

La surface de la matrice est utilisée comme support pour la croissance, mais aussi comme source de nutriments par les micro-organismes. Sa composition minérale ou organique, de même que son pH, ont une influence

sur le type de micro-organismes et les espèces sélectionnées.(**WIKTOR, 2008**).

B. La porosité

La porosité du support influence l'absorption et la rétention par le matériau d'eau après les intempéries ou une humidification quelconque.

Des valeurs de porosité élevées (environ 14% vol) permettent une pénétration en profondeur de l'humidité à l'intérieur du matériau, préparant la voie pour une contamination microbienne jusqu'à 3-5cm. Les matériaux possédant de larges pores favorisent une contamination microbienne temporaire, à cause de leur faible rétention d'eau. Les matériaux à petits pores, avec des temps de rétention d'eau plus longs, offrent des conditions plus favorables pour la colonisation par les micro-organismes. La plupart des microorganismes peuvent se développer à des humidités relatives (HR) comprises entre 60 et 98%.(**WIKTOR, 2008**).

C. La rugosité

Elle influence l'accrochage des cellules apportées par le vent, surtout celles qui sont véhiculées par un écoulement sur un mur. D'autre part, le bullage de surface peut créer des zones de rétention d'eau favorables aux algues. (**WIKTOR, 2008**).

Chapitre II :
Généralités
sur les mycètes

Les moisissures peuvent être définies comme des microorganismes hétérotrophes filamenteux et immobiles, dont la structure cellulaire est celle d'une cellule eucaryote classique. Certaines vivent en symbiose avec des végétaux, d'autres sont des parasites des végétaux ou des animaux, d'autres enfin sont des saprophytes se développant aux dépens de substrats inertes ou en voie de décomposition.

Les moisissures possèdent un appareil végétatif constitué par un thalle filamenteux, le mycélium, dont les filaments s'appellent des hyphes. Le mycélium peut différencier des organes forts variés selon les groupes, spécialisés dans la multiplication et la dissémination, auxquels on accorde la dénomination globale de spores. (TOUATI Radia et al., 2016)

Les moisissures sont aérobies, en général, acidophiles (pH compris entre 3 et 7) et mésophiles (température optimale 20-30°C) Cependant, certaines espèces sont psychrophiles, se développant à basse température ($T^{\circ} < 15^{\circ}\text{C}$ ou même parfois $< 0^{\circ}\text{C}$, comme *Cladosporium herbarium*, *Thamnidium elegans*).

Elles ont, en générale, un faible besoin en eau par rapport à d'autres microorganismes ($A_w = 0.65$) (Boiron, 1996). Elles sont souvent dotées de propriétés lytiques importantes (cellulolytique, pectinolytique, amylolytique, protéolytique, lipolytique, etc...) qui en font des agents de dégradation dangereux mais aussi parfois des alliés utiles (affinage des fromages, production d'enzymes). (TOUATI Radia et al., 2016).



Figure (04) : Structure d'un hyphe et son développement vers la formation d'un mycélium ; (A) hyphe coenocytique ; (B) hyphe cloisonne (Mme. GHORRI Sana, 2015).

1. Classification

Le nombre d'espèces fongiques isolées est estimé à 1 500 000 dont environ 76 000 référencées . La taxonomie la plus courante est basée sur les modalités de reproduction. Elle classe les mycètes en quatre grands embranchements :

les Zygomycètes, les Ascomycètes, les Basidiomycètes, et les Deutéromycètes.

- Les **Zygomycètes**, dont la plupart vivent dans le sol sur des matières organiques animales ou végétales en décomposition, ont des hyphes non septés. Leur reproduction asexuée est le plus souvent assurée par des sporocystospores ou parfois par des « conidies exogènes » se développant dans des sporanges à l'extrémité d'hyphes aériens. Leur reproduction sexuée résulte de la fusion de gamétocystes conduisant à la formation de spores dormantes permettant aux microorganismes de résister aux conditions défavorables de croissance. Lors de leur germination, les zygosporés s'ouvrent et forment un sporange asexué.

- Les **Ascomycètes** ont un thalle septé ou unicellulaire (levure). Si leur reproduction peut être sexuée, avec formation, dans des asques en forme de

massue ou de sac, de spores méiotiques (ascospores), beaucoup d'Ascomycètes se reproduisent par multiplication asexuée (conidies).

- Les **Basidiomycètes**, comme les Ascomycètes, ont un thalle septé ou unicellulaire (levures). La reproduction de ces champignons est, soit sexuée avec formation de spores méiotiques (basidiospores) sur des basides, soit asexuée (conidies).

- Les **Deutéromycètes**, dont le cycle de vie est représenté sur la Figure 1, regroupent les moisissures pouvant vivre et se multiplier sans phase sexuée, et la plupart des formes asexuées ou « imparfaites » (anamorphes) des Ascomycètes et des Basidiomycètes.

La multiplication des **Fungi imperfective** se fait généralement par production de spores mitotiques (issues d'une mitose) appelées conidies. Les éléments de cette classe sont le plus souvent terrestres, saprophytes ou parasites de plantes.

(http://doxa.u-pec.fr/theses/th0211056_04_chap1_synthese_biblio.pdf).

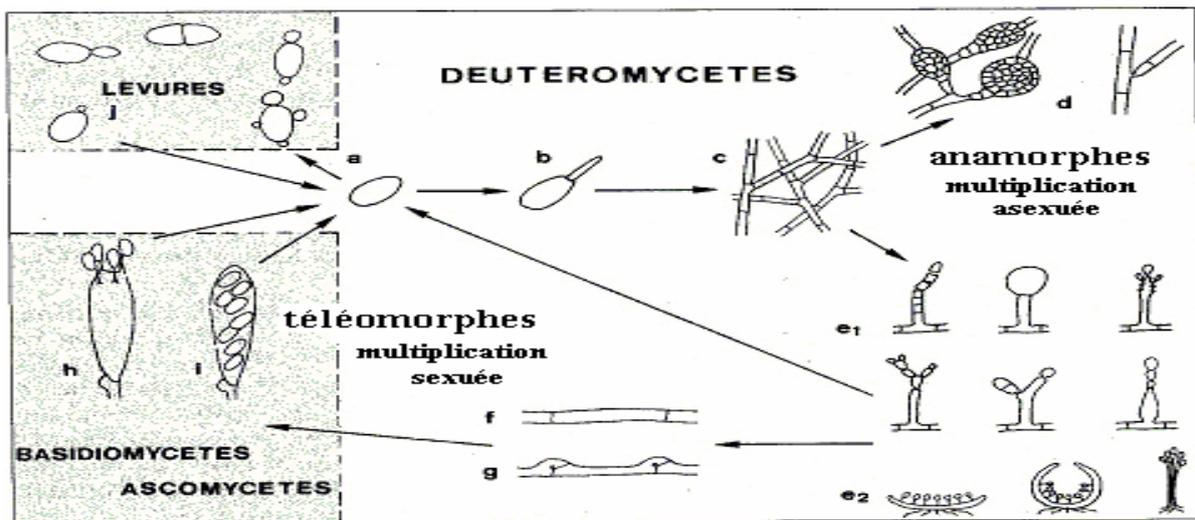
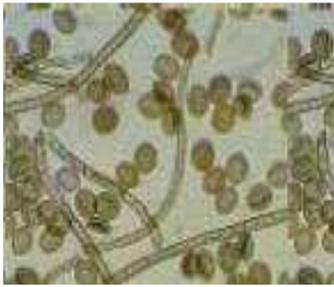


Figure 5: Stade du cycle vital

(http://doxa.u-pec.fr/theses/th0211056_04_chap1_synthese_biblio.pdf).

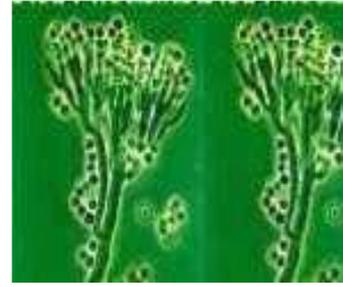
- a : unité de dissémination : basidiospore, ascospore (produite par la téléomorphe) ou conidie (produite par l'anamorphes).
- b : germination de l'unité de dissémination.
- c : mycélium issu de la germination.
- d : mycélium ne produisant pas de conidies.
- e : production de conidies par des conidiospores.
- e1 : conidiophores isolés portés par le mycélium.
- e2 : conidiophores groupés en conidiome issu du mycélium.
- f : mycélium non bouclé des Ascomycètes et de certains Basidiomycètes.
- g : mycélium dicaryotique à boucles (ou anses d'anastomose) de certains Basidiomycètes.
- h : baside à basidiospores externes.
- i : asque à ascospores internes.
- j : levure unicellulaire (multiplication sans production de mycélium).



Cladosporium



Aspergillus



Penicillium



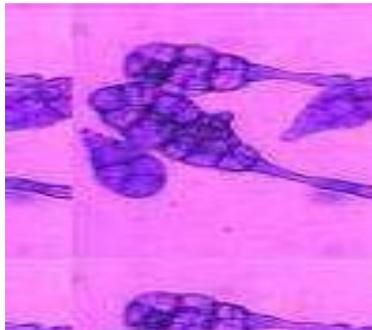
Fusarium



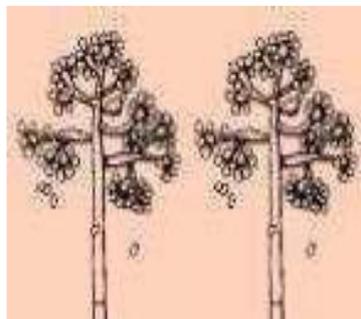
Acremonium



Mucor



Alternaria



Botrytis



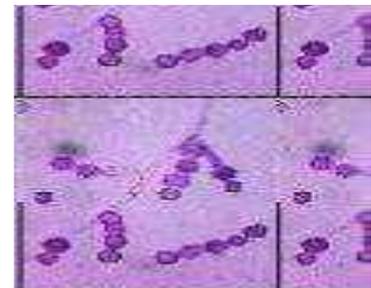
Neurospora



Helminthosporium



Trichothecium



Scopulariopsis

Figure (06) : Quelques champignons filamenteux (TOUATI Radia et al., 2016).

2. Modes de reproduction

La plupart des champignons possèdent deux modalités de reproduction :

la reproduction asexuée (imparfaite ou végétative), et **la reproduction sexuée**.

- **La reproduction végétative** des champignons résultant d'une fragmentation du thalle ou d'une sporulation, représente le plus souvent la principale source de dissémination du parasite lors de la fragmentation du thalle. Les ramifications se séparent les unes des autres à la suite de la dégénérescence de la partie basale d'hyphe dont elles dérivent. Il est rare que l'ensemble du cytoplasme du thalle se transforme en spores lors de la multiplication végétative.
- **La reproduction sexuée** des champignons comporte une plasmogamie (fusion des cytoplasmes de deux gamètes) suivie d'une caryogamie (fusion des noyaux correspondants) et d'une méiose (division réductionnelle).

Les types de spores sexuées sont au nombre de quatre : **l'oospore, la zygosporé, l'ascosporé et la basidiosporé (Melle BEN BORDI Intissar et al., 2019)**. Le mycélium bien que contenant un cytoplasme mobile, et lui-même incapable de se déplacer à cause de la rigidité de ses parois.

On parle aussi communément des moisissures pour désigner les champignons chez lesquels les organes de fructification ont une structure nettement filamenteuse. Elles s'opposent aux champignons comestibles ; dans les corps fructifiant sont charnus (**Melle BEN BORDI Intissar et al., 2019**)

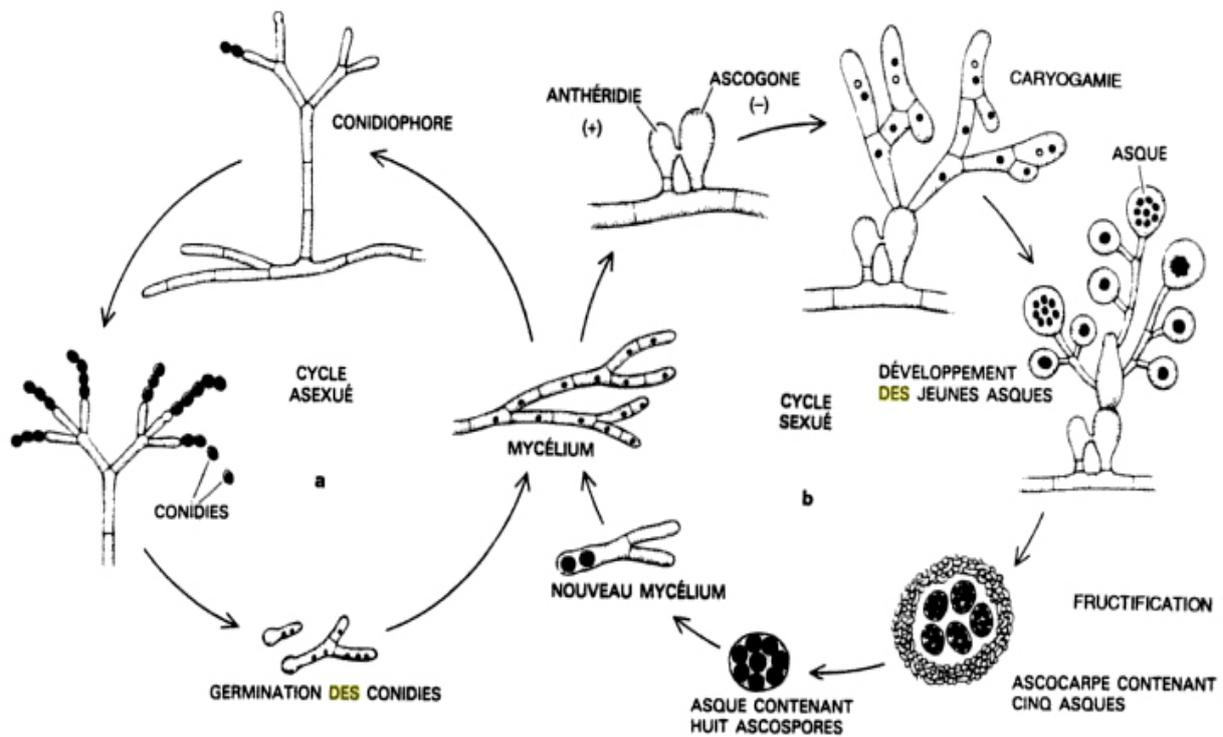


Figure 7: Schéma de la reproduction des moisissures
(Melle BEN BORDI Intissar et al., 2019)

3. Cycle de vie

Le cycle de vie des moisissures est illustré par 4 principales étapes (Figure 3) germination, développement, reproduction et dormance/latence.

Le cycle de vie des moisissures en milieu intérieur débute lorsqu'une spore se dépose sur une surface lui offrant les conditions nécessaires à sa croissance. En fait, la germination se déclenche par la présence d'eau combinée ou non à certains facteurs très spécifiques comme l'intensité lumineuse, certaines températures ou types d'éléments nutritifs. La spore germera alors et donnera naissance à un premier filament non différencié, appelé hyphes, qui s'allongera pour former un ensemble appelé mycélium. Cet ensemble de filaments, plus ou moins ramifiés, constitue le thalle des champignons. En présence de conditions favorables à la sporulation, le

mycélium donnera naissance à des structures plus spécialisées, qui produiront des spores asexuées (conidies) ou, plus rarement, des spores sexuées.

Chaque moisissure produit un très grand nombre de spores dont l'ensemble, appelé sporée, se présente très souvent sous un aspect poudreux et coloré à la surface de la moisissure. La taille, la forme et la couleur des spores de moisissures varient grandement d'une espèce à l'autre. Par contre, en microscopie, toutes les spores d'une même espèce sont de couleur, de dimension et de forme relativement constante ce qui, dans bien des cas, constitue un élément d'identification taxonomique.

(TOUATI Radia et al., 2016)

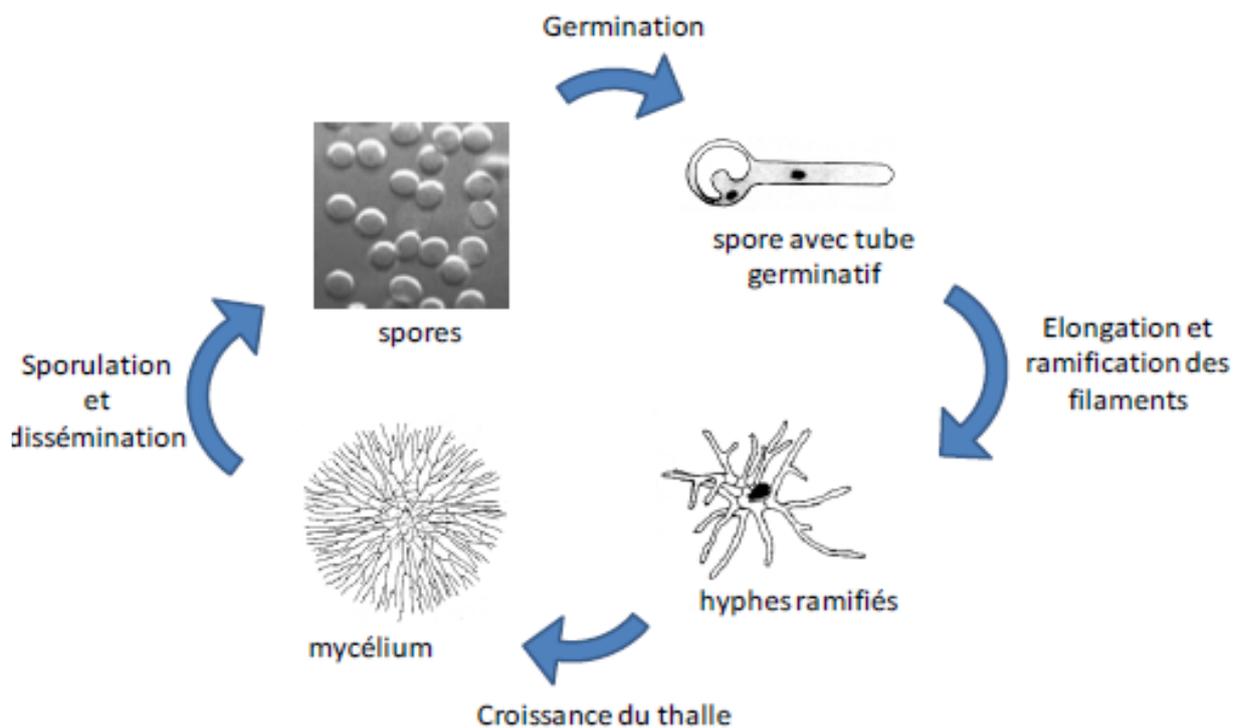


Figure 8 : Cycle de vie des moisissures. (TOUATI Radia et al., 2016).

4. Identification des champignons

Dans le cadre de ce travail portant sur la prolifération des mycètes sur les matériaux de construction. Il est important de pouvoir les identifier afin d'envisager des méthodes préventives à leur développement. L'identification des champignons repose sur des critères macroscopiques, microscopiques et moléculaires après isolation et culture sur milieux de culture.

- **Les critères macroscopiques** reposent sur l'observation des colonies et de leur couleur recto et verso, leur taille, leur relief, leur aspect (filamenteux, collant), leur transparence (opaque, translucide), l'allure des contours et la pigmentation.
- **Les critères microscopiques** sont fondés sur l'aspect morphologique des différentes structures des champignons : le type de thalle (septé ou non), la couleur des hyphes (foncées ou claires), la forme des spores, l'origine des spores (endogène ou exogène), la forme des têtes (en forme de pinceau, aspergillaire). **La figure (09)**, indique l'exemple des genres **Penicillium** et **Aspergillus** qui se différencient par l'aspect macroscopique et microscopique avec par exemple ici, la forme des têtes très différentes en termes de vésicules, phialides etc. (**Sarah Boudih, 2011**).

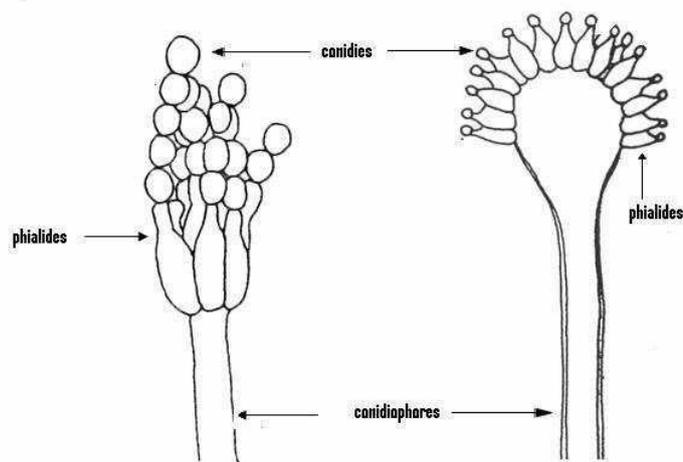


Figure 9: Schéma de la structure d'un **Penicillium** à gauche et de celle d'un **Aspergillus** à droite. (Sarah Boudih, 2011).

Outre des critères morphologiques, il existe maintenant des critères moléculaires qui permettent une identification précise des espèces. Les loci les plus souvent testés sont les **ADN** codant pour les différentes fractions des **ARN** ribosomiaux. Nous avons utilisé les critères morphologiques et moléculaires (**ADN**), afin d'identifier les champignons présents sur les papiers peints et les zones de fixing de papiers patrimoniaux. (Sarah Boudih, 2011).

5. Facteurs de développement

Les moisissures ont un métabolisme actif en rapport avec leur mode de nutrition par absorption. Leurs développements sont dépendants de la nature des substrats disponibles (cellulose, lignine, etc...) et les conditions physiques : températures, activité de l'eau (A_w) ou disponibilité en eau, pH et oxygène.

Aussi, Gock et ses collaborateurs (2003), signalent que la température, l'activité de l'eau et le pH contrôlent largement la germination et la croissance des moisissures xérophiles. Les conditions de développement de chaque espèce est spécifique en terme de condition physicochimique.

(Melle. MEGHAZI Nassima, 2015)

- La température

Elle joue un rôle prépondérant sur la croissance mycélienne. D'une manière générale, les moisissures peuvent se développer sous des températures allant de moins zéro à plus de 50°C . Les moisissures les plus courantes sont mésophiles, elles se développent entre 15°C et 30°C dont l'optimum se situe entre 20°C et 25°C.

Cependant certaines espèces sont psychrophiles, tel que *Cladosporium herbarum* qui peut croître à -6°C sur viande réfrigérée.

D'autres souches peuvent se développer à des températures très hautes. (Chapel et al., 2005). Ces dernières sont appelées les thermophiles extrêmes capables de se développer au-dessus de 45°C (*Aspergillus*, *Cladosporium*). (Melle. MEGHAZI Nassima, 2015).

- L'humidité

Elle est optimale entre 0,78 et 0,84 pour *Aspergillus flavus*. C'est le facteur le plus important et commun à toutes les moisissures. (Melle BEN BORDI Intissar et al., 2019).

- Le pH

Le développement d'un champignon sur un substrat donné est liée à des propriétés inhérentes au champignon telles que la capacité à produire des métabolites (enzyme, pigments, synthèse de toxine). La tolérance au pH est assez grande $\text{pH} = 2$ à $7,5$ (Melle BEN BORDI Intissar et al., 2019).

- L'oxygène

La plupart des moisissures sont aérobies et exigent une bonne oxygénation et un taux de CO_2 inférieur ou égal à 10% cependant, certains tolèrent des quantités relativement faible d'oxygène et peuvent même se développer en anaérobiose (Melle BEN BORDI Intissar et al., 2019)

- La lumière

Les radiations du spectre visible (380 – 720) n'ont en général pas d'action sur la croissance végétative des champignons mais peuvent agir sur la sporulation. La plupart des moisissures n'exigent pas de lumière pour leur croissance, ni pour la germination de spores. (Melle BEN BORDI Intissar et al., 2019).

- La composition chimique du substrat

En effet, la présence d'atomes nécessaires au champignon, comme le carbone ou l'azote favorise la croissance du champignon. Au contraire, une matrice très complexe avec la présence d'inhibiteurs de croissance, ne favorise pas la croissance des champignons. (Sarah Boudih, 2011).

- L'activité en eau (Aw)

L'Aw d'un aliment dépend de sa composition chimique, c'est-à-dire de la quantité d'eau retenue par les sels, sucres et protéines, ainsi que de ses caractéristiques physiques (porosité, polarité). Ce paramètre peut varier de 0 (pour les substrats dans lesquels toute l'eau est retenue) à 1 (pour l'eau pure).

Les moisissures sont, de façon schématique, plus **xérotolérantes** que les autres microorganismes (bactéries, levures). La plupart des moisissures se développent bien pour des activités en eau voisines de 0,85. Par conséquent, beaucoup de produits dont l'activité hydrique ne permet pas la croissance bactérienne peuvent être colonisés par les moisissures (TOUATI Radia et al., 2016).

6. Métabolites secondaires et mycotoxines

Le terme mycotoxine dérive du grec « **mycos** », signifiant champignon et du latin toxicum signifiant « poison ». Ce sont des métabolites secondaires produits après la phase de croissance du champignon. Ils se distinguent des métabolites primaires comme par exemple les produits de la glycolyse, qui sont primordiaux pour tout être vivant.

Le métabolisme secondaire est très diversifié, d'où la multitude de métabolites secondaires. Tous les métabolites secondaires ne sont pas néfastes pour l'homme. Il en est ainsi pour les antibiotiques. Il existe environ 300 à 400 mycotoxines (Sarah Boudih, 2011)

Plusieurs genres de moisissures sont connus comme étant producteurs de mycotoxines. Parmi eux, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Alternaria*. Une même espèce fongique peut produire plusieurs sortes de mycotoxines selon les conditions de culture et une même mycotoxine peut être produite par plusieurs espèces fongiques différentes. Quelques exemples de genres de moisissures et de leurs mycotoxines ont regroupés dans le tableau (02) ci-dessous. (Sarah Boudih, 2011).

Genres	Espèces	Principales mycotoxines
<i>Alternaria</i>	<i>A. alternata</i>	A.alternaria Alvertoxine I, II, alternariol, altenuisol,acide tenuazoïque
<i>Aspergillus</i>	<i>Aspergillus</i>	AflatoxineB1et B2, citrine
	<i>A.fumigatus</i>	Fumigaclavine, fumigatoxine,fumitremorfène, gliotoxine, acide helveolique, etc.
	<i>A.niger</i>	Acide oxalique
	<i>A.versicolor</i>	Aspercolorine, sterigmatocystine, versicolorine
<i>Cladosporium</i>	<i>C.spp</i>	Cladosporine, émodine, acide épicladosporique
<i>Fusarium</i>	<i>F.spp</i>	Trichotécènes (typeB), toxineT2, fuminisine, vomitoxine, zearalenone
<i>Penicillium</i>	<i>P.brevicom pactum</i>	BrevianamideA, acide mycophénolique
<i>Stachybotrys</i>	<i>S.chartarum</i>	Trichotécènes : satratoxineF, G, H,lacone, roridine, trichoverrine,sporidesmineG, verrucarineJ

<i>Trichoderma</i>	<i>T.viride</i>	Trichodermine, trichoverine, satratoxine, gliotoxine, fumitremogène, isocyanide, toxine T-2
--------------------	-----------------	---

Tableau (02) : Exemples de mycotoxines produites par certaines moisissures.

(Behnas Djihad, Benayache Amina, 2015).

7. Les micromycètes impliqués dans la biodétérioration

La plupart de ces champignons appartiennent à la classe des ascomycètes. En général, deux groupes de champignons sont isolés de la surface des pierres :

- **le premier groupe** inclus les espèces des genres *Fusarium*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Phoma*.
- **le second groupe** inclus les champignons appelés méristématiques ou MCF (Micro Colonial Fungi). D'un point de vue taxonomique, ils représentent un vaste groupe hétérogène de champignons à la pigmentation sombre. Ils partagent comme caractéristique commune, la présence de mélanine à l'intérieur de leurs cellules (cellules qui gonflent, hyphes et/ou spores).

Le premier groupe est dominant lorsque les conditions sont favorables tandis que le second prévaut en environnement rude et hostile. Il est très probable que les champignons méristématiques en particulier possèdent leur niche écologique naturelle sur la surface des pierres et donc de la plupart des matériaux de construction. (WIKTOR, 2008).

Certaines souches, comme *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*, sont responsables de la biodétérioration du matériau par voie chimique (production d'acides organiques) alors que d'autres, comme

Alternaria, Phoma, Conosporium attaquent le matériau par voie physique

(pénétration)

microscopique

Exophiala

(W.D.)



A- *Aspergillus niger*

Figure 10 :Aspect micro et macroscopique d'*Aspergillus niger*

(Melle BEN BORDI Intissar et al., 2019)

C'est une espèce qui est souvent identifiée à partir de prélèvements sur sites de monuments ou bâtiments. C'est un champignon acidogénique, c'est-à-dire qu'il produit des acides organiques, tels que l'acide ascorbique, citrique, acétique, gluconique,....

Aspergillus niger est une espèce du genre *Aspergillus*. Il existe plus de 160 espèces d'*Aspergillus*. *Aspergillus niger* se développe aussi bien sous peu de lumière (à l'intérieur), que sous la forte lumière de l'extérieur. C'est une

espèce toxique et pathogène : elle provoque des otomycozes (mycoses pulmonaires) chez l'homme et les oiseaux.

Elle peut provoquer l'aspergillose du conduit auditif externe chez les sujets présentant une lésion préalable ou une malformation anatomique du conduit auditif. Cependant, elle possède des toxines à propriétés insecticides, actives sur les moustiques responsables de la fièvre jaune. (WIKTOR, 2008).

Ce champignon pousse rapidement (2-3 jours) sur les milieux de culture classiques (géloses au malt et Sabouraud). La température optimale de croissance varie généralement entre 25 et 30°C, mais *A. niger* peut se développer jusqu'à 42°C. Les colonies de ce champignon sont granuleuses, blanches au début, puis jaunes et, à maturité, elles deviennent noires. Le revers des colonies est incolore ou jaune pâle. Sur le milieu Czapek, *A. niger* forme des colonies à mycélium blanc ou jaune, et revers souvent incolore.

(Melle BEN BORDI Intissar et al., 2019)

B- Alternaria alternata



Figure 11 : Aspect micro et macroscopique d'*Alternaria alternata* (<http://biologie.ens-lyon.fr/ressources/tp-direct/etude-de-la-morphologie-de-la-levure-alternaria-alternata>).

Alternaria alternata est une levure issue du sol que l'on retrouve très fréquemment dans l'atmosphère et les maisons. Elle se développe de façon optimale à la chaleur et à l'humidité. La présence de plantes peut favoriser sa multiplication. Elle appartient à la classe des Deutéromycètes et à la famille des Pléosporacées.

Alternaria alternata peut se cultiver facilement à 30°C dans des conditions aérobies sur un milieu MEA de pH 5,4. *Alternaria alternata* peut en outre survivre dans un environnement défavorable, en particulier dans des conditions d'anoxie (taux d'oxygène de 0,25%). Ses spores, très résistantes, restent viables pendant plusieurs années.

(<http://biologie.ens-lyon.fr/ressources/tp-direct/etude-de-la-morphologie-de-la-levure-alternaria-alternata>).

- **Aspect macroscopique d'*Alternaria alternata***

Après 7 jours de culture, les colonies apparaissent noires et duveteuses et présentent une texture épaisse. Cette culture d'*Alternaria alternata* s'effectue sur milieu MEA, pH 5,4, à 30°C.

- **Aspect microscopique d'*Alternaria alternata***

Sous microscope à faible grossissement (x 10), la moisissure se présente sous la forme de longs filaments mycéliens (hyphes). Dans cette préparation, les filaments frais ont été colorés au bleu coton lactique. Au milieu des filaments, des structures reproductrices brunes du champignon sont visibles : les conidies. Les conidies sont des spores asexuées qui assurent la reproduction asexuée de la levure.

A plus fort grossissement (x 20), l'aspect cloisonné des conidies. (<http://biologie.ens-lyon.fr/ressources/tp-direct/etude-de-la-morphologie-de-la-levure-alternaria-alternata>).

Chapitre III :
Techniques
d'analyse et de lutte
contre les
moisissures

1. Techniques d'analyse et de caractérisation des moisissures

Différentes techniques optiques, chimiques et physiques peuvent être utilisées pour l'étude de l'impact microbien sur les matériaux de construction. Les techniques optiques les plus utilisées sont l'observation directe, la microscopie optique, la pétrographie de section mince, la microscopie électronique à balayage (environnemental). La microscopie laser confocale, et la microscopie à force atomique. Les techniques physiques les plus communes sont l'assimilation d'eau, la porosimétrie, la thermogravimétrie, les analyses thermiques différentielles, les mesures de perte de masse. **(WIKTOR, 2008)**.

Parmi les techniques chimiques importantes, nous pouvons citer la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, l'analyse de la dispersion d'énergie des rayons X, la diffraction des rayons X, chromatographie échangeuse d'ions, chromatographie liquide haute performance, spectroscopie d'émission atomique. **(WIKTOR, 2008)**.

1.1. Les techniques biologiques

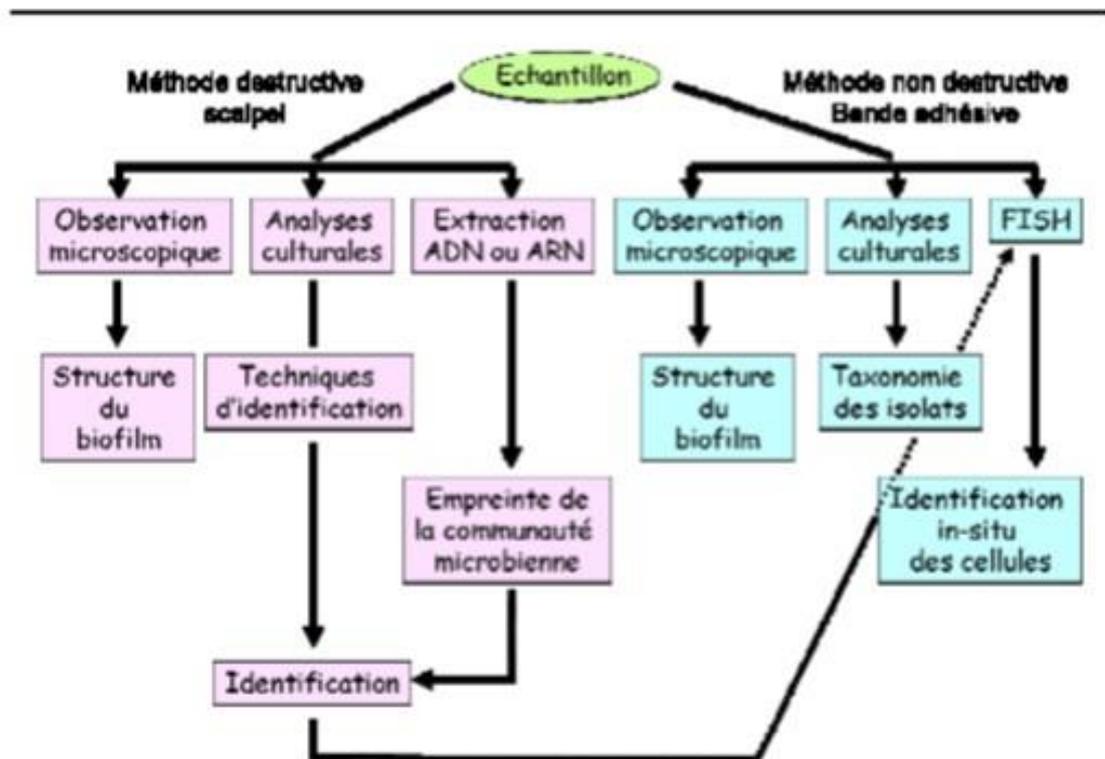
- Échantillonnage

L'échantillonnage est le suivi de la croissance biologique sur les matériaux de construction doivent être réalisés en utilisant des techniques qui sont non seulement non contaminantes, et si possible non destructives. Plusieurs méthodes non destructives ont été proposées Pour la mise en évidence directe ou indirecte de la colonisation microbienne. Procédures avec aiguilles et seringue, empreinte sur agar, mesure de l'activité microbienne, détection des bactéries par fluorescence des anticorps, techniques de bioluminescences, et dosage de l'ATP ont été décrites par plusieurs auteurs. **(WIKTOR, 2008)**.

Cependant, malgré leur indéniable utilité, ces techniques ne donnent aucune information sur les relations entre les micros – organismes et la surface

même . L'utilisation de bandes adhésives, technique empruntée à la mycologie clinique, a été utilisée pour la première fois par Gargani en 1968 dans le domaine du patrimoine culturel pour mettre en évidence la croissance de champignons sur des fresques après les inondations de 1966 à Florence. (WIKTOR, 2008).

Les bandes adhésives sont appliquées délicatement sur la surface de la pierre et sont placées immédiatement sur une lame de microscope stérile et sont conservées dans une boîte jusqu'au laboratoire. Les bandes sont ensuite coupées en petits morceaux pour l'observation au microscope et l'analyse culturale.



Figure(12) : Méthodologie schématique pour l'étude microbiologique de la biodétérioration selon les techniques d'échantillonnage (WIKTOR, 2008)

- Méthodes de cultures

Les méthodes de cultures ont pour but de quantifier, d'isoler et de réaliser une caractérisation taxonomique, biochimique et physiologique des micros – organismes présents. L'identification est basée sur la macro – morphologie des colonies qui se sont développées sur différents milieux de culture, et sur la micro – morphologie des structures reproductives. Dans certains cas, des méthodes moléculaires telles que le séquençage complet des gènes de l'ADNr, offrent la possibilité d'identifier et de caractériser des espèces qu'il est impossible de reconnaître par les procédures morphologiques, biochimiques et physiologiques traditionnelles. Ces méthodes donnent également des informations sur la phylogénie des souches. **(WIKTOR, 2008).**

- Méthodes moléculaires

Actuellement, une approche pour étudier la communauté microbienne est l'utilisation de techniques microbiennes comme la **DGGE** (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis) et la **SSCP** (Single Strand Conformational Polymorphism). **(WIKTOR, 2008).**

Le but de ces techniques est de caractériser la communauté microbienne totale (micro – organismes cultivables et non cultivables) par extraction de l'**ADN** total et amplification à l'aide d'amorces universelles de l'**ADNr 16S**.

L'électrophorèse des fragments amplifiés est réalisée sur gel de polyacrylamide dans un gradient dénaturant en urée et formamide (DGGE), ou après digestion d'un des deux filaments d'ADN (SSCP). Dans les deux cas, les bandes obtenues correspondent à une seule espèce microbienne.

Ces techniques sont largement utilisées pour la caractérisation de la communauté microbienne sur des échantillons de pierre prélevés sur différents monuments. **(WIKTOR, 2008).**

Vaestrate et ses collaborateurs (2001) ont utilisé des méthodes moléculaires pour déterminer les communautés microbiennes présentes sur les parois en béton de tuyaux d'égouts. L'empreinte génétique est obtenue DGGE de fragments de gènes d'ARN 16S.

Ils observèrent des changements au niveau des bandes dominantes en comparant les profils DGGE des communautés bactériennes présentes sur la surface du béton sain et du béton corrodé. Avec l'utilisation d'outils statistiques, il a été possible de distinguer deux groupes différents, correspondants à la communauté microbienne de tuyaux sains et corrodés respectivement. (WIKTOR, 2008).

La caractérisation des communautés microbiennes a montré que les séquences de bandes les plus représentatives présentent le plus haut niveau de correspondance avec les séquences des souches bactériennes *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Acidithiobacillus* sp. *Mycobacterium* sp. Et différents hétérotrophes, *Acidobacteria* et *Actinobacteria*.(WIKTOR, 2008).

- Détection de biomolécules

Les cellules peuvent être détectées et quantifiées par analyse de molécules biologiques spécifiques, telles que les protéines, les phospholipides, les acides nucléiques, la chlorophylle ou les enzymes. Les dosages d'enzymes peuvent être particulièrement utiles, étant donné qu'ils mesurent les cellules actives plutôt que simplement les cellules qui peuvent se reproduire pour donner des colonies sur milieu solide.(WIKTOR, 2008).

- Coloration des cellules

Différentes Colorations peuvent être utilisées pour rendre les cellules microbiennes visibles au microscope. Certains colorants fluorescents, tels que l'acridine orange et **DAPI** (4',6- diamino-2-phenyllindole) permettent de compter les cellules et de distinguer leur forme, sans les enlever du substrat.

D'autres colorants fluorescents permettent de différencier les cellules vivantes ou actives de celles qui sont mortes ou non – actives. (WIKTOR, 2008).

L'utilisation de l'acide périodique et du réactif de Schiff permet la coloration en rouge de composés tels que les **EPS**, le glycogène, l'amidon, la cellulose, la chitine, les complexes protéines –carbohydrates, et les glycolipides. Cette technique a été préposée pour les matériaux de construction par Warscheid (1990) et a été ensuite appliquée avec succès pour estimer l'étendue de la colonisation microbienne sur / dans les matériaux. (WIKTOR, 2008).

1.2. Analyses physiques et chimiques

A. Analyse chimique élémentaire par voies physiques

Les méthodes physiques couramment utilisées sont la spectrométrie d'absorption atomique (**SAA**), la spectroscopie d'émission atomique par plasma (**ICP**), et la spectrométrie de fluorescence X (**SFX**). Les spectromètres utilisés comportent tous une source lumineuse (**SAA**) ou une source d'excitation (**ICP** et **SFX**), un monochromateur , un système de comptage et très souvent un micro – ordinateur pour l'acquisition et le traitement des données .

Ces méthodes physiques sont des méthodes comparatives qui nécessitent des étalonnages réalisés soit à partir de matériaux étalons de composition connue avec précision, soit à partir de mélanges synthétiques préparés avec des produits de pureté analytique ou bien encore en utilisant des solutions prêtes à l'emploi.

Ces étalons servent à l'établissement de courbes d'étalonnage qui permettent de déterminer la concentration de l'élément dans le produit à analyser. Pour les méthodes SAA et ICP, les Analyses sont réalisées après mise

en solution des matériaux. Par contre, pour la SFX, les Analyses sont effectuées directement sur le matériau en poudre. (WIKTOR, 2008).

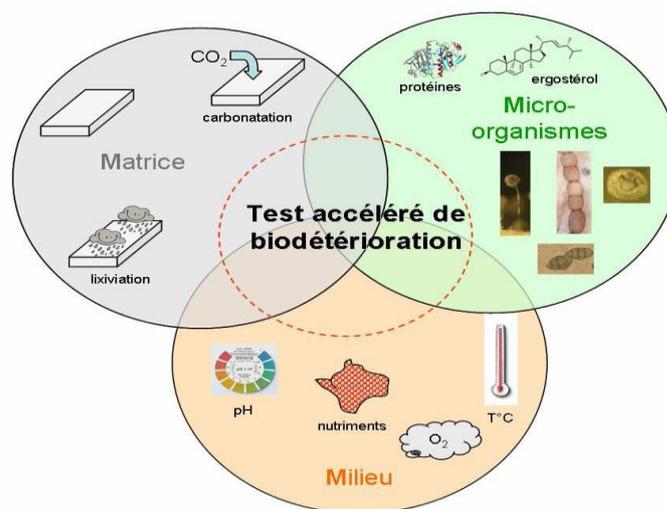
B. Analyse minéralogique d'un matériau

Elle a pour objet l'identification et le dosage des minéraux constructifs du matériau. Son processus est très différent de celui de l'analyse chimique qui ne donne que la composition élémentaire des matériaux, exprimée en oxydes, à l'exception de quelques cas où les teneurs de certains espèces minérales peuvent être calculées directement à partir de l'analyse élémentaire (chlorures alcalins, carbonates de calcium). (WIKTOR, 2008).

L'analyse minéralogique utilise les résultats de plusieurs méthodes instrumentales qui sont utilisées pour caractériser un minéral par :

- **Sa structure cristalline** (répartition des atomes dans des réseaux géométriques), qui est mise en évidence la diffractométrie des rayons X.
- **Son réseau cristallin** qui peut être extrait du spectre de diffraction de rayon X obtenu sur l'échantillon (méthode de Debye et Scherrer) ;
- **Sa teneur dans un mélange**, qui peut être déterminée, dans certains cas par diffractométrie quantitative de rayon X, par les méthodes dites de l'étalon interne, de l'étalon externe et d'addition ; les choix des raies et des étalons peuvent parfois poser des problèmes dans le cas de composés comportant plusieurs minéraux, ce qui entraîne une erreur relative souvent élevée sur les résultats obtenus :
- **Sa morphologie** (taille et forme des particules), ainsi que ses défauts (dislocation, joints de grain, etc.) qui peuvent être observés ou évalués par microscope optique et électronique :

- **Sa composition élémentaire approchée**, qui peut être déterminée localement par l'analyse à la sonde électronique (dite sonde de Castaing) ou au microscope électronique à balayage équipé d'un spectromètre X soit à dispersion de longueur d'onde soit à dispersion d'énergie (EDS) ;
- **Son comportement thermique** (polymorphisme en fonction de la température, identification et dosage de certaines phases cristallines et surtout amorphes, état de l'eau dans les hydrates), qui peut être mis en évidence principalement par analyse thermogravimétrique (**ATG**), par analyse thermique différentielle (**ADT**), par analyse enthalpique différentielle (**AED**, **DSC**) et aussi par dilatométrie ;
- **Les énergies de réaction, d'oxydation et de décomposition**, exprimées en variation d'enthalpie, qui peuvent être mesurées par microcalorimétrie par analyse enthalpique différentielle. Les énergies de liaison intramoléculaires et interatomiques qui peuvent être révélées dans certains cas par la spectrométrie d'absorption dans l'infrarouge. (**WIKTOR, 2008**).



Figure(13) : Représentation schématique du système considéré pour l'étude de la biodétérioration. (**WIKTOR, 2008**).

1.3. Exemples d'application

Nele De Belie et ses collaborateurs (2004) ont travaillé sur l'analyse de matériaux de construction soumis à la biodétérioration. Ils ont analysé du béton, des mortiers, et des pierres. Le but de leur étude était de déterminer la composition de composés cristallins formés suite à l'action de micro – organismes. (WIKTOR, 2008).

L'observation au **MEB** a montré la présence de cristaux formés sur des échantillons de béton suite à l'interaction avec des acides organiques produits par des bactéries. Les Analyses **DRX** ont révélé que ces cristaux contenaient de l'acétate de calcium, différents hydrates d'acétate de calcium, et des hydrates de lactate de calcium. Ces analyses ont également montré que les cristaux de carbonate de calcium formés par l'action microbologique de **Bacillus sphaericus** étaient de la latérite et de la calcite. Mema Ribas Silva et autres, (1995) ont étudié la **biodétérioration** du béton en combinant l'analyse de plusieurs techniques : ATD – TG, DRX, et MEB / EDS. (WIKTOR, 2008).

Ces techniques ont donné des informations très utiles sur les caractéristiques du matériau concernant la biodétérioration. Les Analyses ATD et DRX ont permis d'identifier les composés amorphes et cristallisés, y compris les produits issus de la détérioration. Les Analyses MEB / EDS ont permis d'observer, entre autres, la présence de ces composés, la texture du matériau est également de détecter la présence de microorganismes et de caractériser leur morphologie. (WIKTOR, 2008).

2. Les outils actuels de lutte contre la prolifération des moisissures sur le matériel constructif

Lorsque les processus de biodégradation sont considérés importants, le développement et la sélection de traitements résistants aux microorganismes sont conseillés. D'un autre côté, les mesures peuvent être de très courte durée, et peuvent même conduire à une augmentation de la contamination microbienne et par conséquent d'activité biodétérioratrice. **(WIKTOR, 2008).**

2.1. Nettoyage

Le nettoyage à l'eau des surfaces aide à enlever les efflorescences et les sels solubles, mais à long terme cela conduit à une répartition microbienne plus importante due à l'augmentation de l'humidité. **(WIKTOR, 2008).**

Les nettoyages physiques et chimiques peuvent occasionner une décoloration et de sévères dommages aux ouvrages. **(WIKTOR, 2008).**

2.2. Méthodes chimiques

Au Brésil, le coût pour repeindre les bâtiments est estimé approximativement à 4 % du coût total des bâtiments, et il est nécessaire de repeindre environ tous les 2 à 5 ans, selon les caractéristiques du bâtiment. Les biocides (en particulier les algicides et les fongicides) sont généralement incorporés dans les formulations des peintures dans le but d'allonger la période entre deux opérations de peinture.

Les biocides commerciaux et les substances actives antimicrobiennes peuvent être classées en : alcools, aldéhydes, acides organiques, esters, phénols et leurs dérivés, composés halogénés, métaux et substances organo – métalliques, oxydants, enzymes, surfaces actives, divers produits synthétiques organiques. **(WIKTOR, 2008).**

L'utilisation de biocides a un impact négatif sur l'environnement : ils peuvent être lessivés et se retrouver dans différents compartiments écologiques. L'objection la plus importante à l'utilisation de biocides pour les ouvrages exposés à la fréquentation humaine est l'impact écotoxicologique des agents biocides. Les effets allergènes et synergiques des biocides sur la santé humaine ne sont pas totalement compris. Ces effets potentiels doivent être sérieusement considérés lors de la sélection d'un biocide et de sa méthode d'application. **(WIKTOR, 2008).**

Plus récemment, le projet européen PICADA (Photocatalytic Innovative Covering Applications for De – pollution Assessment, 2006) a vu le jour. L'objectif est de développer une gamme de revêtements de façades autonettoyants et dépolluants à base de photocatalyseur, le **TiO₂**. Ce projet regroupe des centres de recherche, dont le **CSTB**, des industriels des matériaux, de la chimie et du bâtiment. **(WIKTOR, 2008).**

2.3. Méthodes physiques

Les traitements par radiations ionisantes et l'irradiation sous **UV** ont prouvé leur efficacité la contamination microbienne des pierres. Cependant leur application est limitée aux objets mobiles et de petites tailles.

(WIKTOR, 2008).

Conclusion

Les micro-organismes ont la capacité de se développer sur les matériaux de construction, et sont responsables de changements dans la coloration, et dans les propriétés chimiques et physiques. Nous rappelons ici les points essentiels:

-La biodétérioration est influencée par les conditions environnementales, telles que le vent, la pluie ou encore l'exposition à la lumière, mais également par la bioréceptivité : la composition de la matrice, le pH de la surface, la porosité, et la rugosité.

-Les techniques d'analyses couramment utilisées pour l'étude de la biodétérioration sont empruntées à la microbiologie pour l'analyse de la communauté microbienne (méthodes classiques de microbiologie, méthodes moléculaires, ...), et au domaine des matériaux pour la caractérisation de la matrice (DRX, ATD-TG, porosimétrie ...). Les microscopies optiques ou électroniques apportent également de précieuses informations sur l'interaction entre les micro-organismes et la matrice.

Les champignons sont responsables d'une biodétérioration esthétique (essentiellement due à la présence de pigment fongique), chimique (via la production d'acides organiques), et physique (pénétration en profondeur des hyphes dans la matrice).

-Quatre grandes catégories de champignons sont impliquées dans la biodétérioration : (i) les hyphomycètes producteurs de mélanine comme *Alternaria alternata*, (ii) les hyphomycètes acidogéniques tel qu'*Aspergillus niger*, (iii) les « yeastlike fungi » comme *Exophiala* sp. (iv) les champignons méristématiques avec *Conosporium uncinatum*.

-La biodétérioration est un domaine complexe pour lequel l'impact biologique ne peut être dissocié des conditions environnementales jouant sur le vieillissement naturel du matériau. Tous ces facteurs sont étroitement liés et agissent en interaction.

-les outils efficaces de lutte contre ces moisissures telles que le nettoyage à l'eau des surfaces aide à enlever les efflorescences et les sels solubles, des méthodes chimiques comme les biocides commerciaux et les substances actives antimicrobiennes , et des méthodes physiques telles que les traitements par radiations ionisantes et l'irradiations sous **UV**.

Résumé

Le but de cette étude est de découvrir l'impact de la prolifération des mycètes sur les matériaux de construction.

Les mycètes peuvent se développer sur les matériaux de construction et sont capables de dégrader les propriétés du matériau : de l'altération de l'aspect esthétique jusqu'à une réduction de sa durabilité. La biodétérioration est associée aux mécanismes chimiques, physiques et esthétiques. Une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans la biodétérioration permettra de mieux lutter contre les dommages engendrés et à terme de prévenir le développement de ces micro-organismes.

Mots clés

Biodétérioration ; matériau de construction ; mycètes, lutte.

Abstract

The aim of this study is to discover the impact of fungal growth on building materials.

Fungi can grow on building materials and are capable of degrading the properties of the material: from deterioration of the aesthetic appearance to a reduction in its durability. Biodeterioration is associated with chemical, physical and aesthetic mechanisms. A better understanding of the mechanisms involved in biodeterioration will make it possible to better fight against the damage caused and ultimately prevent the development of these microorganisms.

Key words

Biodeterioration; building material; fungi, struggle.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو اكتشاف تأثير نمو الفطريات على مواد البناء.

يمكن أن تنمو الفطريات على مواد البناء وتكون قادرة على إضعاف خصائص المادة: من تغيير المظهر الجمالي إلى تقليل متانتها. يرتبط التدهور البيولوجي بالآليات الكيميائية والفيزيائية والجمالية. إن الفهم الأفضل للآليات المتضمنة في التحلل البيولوجي سيجعل من الممكن مكافحة الضرر الناجم بشكل أفضل وفي النهاية منع تطور هذه الكائنات الدقيقة.

الكلمات المفتاحية

تدهور حيوي. مواد بناء؛ الفطريات النضال.

Références bibliographiques

A

_ Alexis SIMONS. (2018). Caractérisation et maîtrise de la prolifération microbienne dans des produits biosourcés pour des bâtiments sains et durables (en vue de l'obtention DOCTORA DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE). P13-14, 21-23

B

- Behnas Djihad et Benayache Amina. (2015). Extraction et identification de mycotoxines de *Penicillium chrysogenum* (Mémoire en vue de l'obtention du Diplôme de Master, Université des Frères Mentouri Constantine). P31.

M

- Melle BEN BORDI Intissar et Melle OUBIRI Feriel. (2019). Détermination des mycotoxines d'*Aspergillus*: caractérisation et réduction de la toxicité (En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Sciences Biologiques, Université EchahidHamma Lakhdar El -OUED). P6-7,10.

- Mme. GHORRI Sana. (2015). Isolement des microorganismes possédant une activité anti- *Fusarium* (en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat 3ème cycle LMD, Université des Frères Mentouri). P5.

-Melle. MEGHAZI Nassima. (2015). Activité antifongique de quelques huiles essentielles sur les moisissures du blé stocké (En vue de l'obtention du diplôme de magistère en sciences agronomiques, Ecole Nationale Supérieure Agronomique). P14-15.

S

- Sarah Boudih. (2011). Identification des moisissures et de leurs métabolites secondaires colonisant des supports papiers : évaluation de la toxicité sur des cellules épithéliales respiratoires in vitro (Pour l'obtention du diplôme de Docteur de l'Université Paris EST). P17-18, 20-22.

T

_ TOUATI Radia et AMOR-CHELIHI Loubna. (2016). Isolement et Identification des Moisissures d'une Zone Aride (Mémoire en vue de l'obtention du Diplôme de Master, Université des Frères Mentouri Constantine). P 2-3, 5-6, 9.

V

_ Virginie WIKTOR. (2008). Biodétérioration d'une matrice cimentaire par des champignons : Mise au point d'un test accéléré de laboratoire (Pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne).P 1, 4-7, 10, 13, 16-23, 37-39, 42, 48-50, 62.

Sites internet :

_ <http://biologie.ens-lyon.fr/ressources/tp-direct/etude-de-la-morphologie-de-la-levure-alternaria-alternata>

_ <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton>

_ http://doxa.u-pec.fr/theses/th0211056_04_chap1_synthese_biblio.pdf

_ <https://www.heidelbergcement.com/en/cement>

_ <https://www.linternaute.fr/bricolage/guide-maison-et-jardin/1411621-dosage-beton>

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Mycologie et biotechnologie fongique.

Spécialité : Mycologie et biotechnologie fongique.

Titre : Impact de la prolifération des mycètes sur les matériaux de construction.

Résumé

Le but de cette étude est de découvrir l'impact de la prolifération des mycètes sur les matériaux de construction.

Les mycètes peuvent se développer sur les matériaux de construction et sont capables de dégrader les propriétés du matériau : de l'altération de l'aspect esthétique jusqu'à une réduction de sa durabilité. La biodétérioration est associée aux mécanismes chimiques, physiques et esthétiques. Une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans la biodétérioration permettra de mieux lutter contre les dommages engendrés et à terme de prévenir le développement de ces micro-organismes.

Mots clés : Biodétérioration ; matériau de construction ; mycètes, lutte.

Membre du jury :

Président du jury : Mlle. Bouchloukh Warda (MAA. UFM. Constantine).

Encadreur : Mme. Mergoud Lilia (MAA. UFM. Constantine).

Examineur : Mme. Almi Hiba (MCB. UFM. Constantine).

**Présenté par : Boudebza Amira
Zaimeche Imene Ikrame**

Année universitaire : 2019 -2020