

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Saad DAHLEB Blida 1



Faculté des Sciences
Département de physique
Mémoire de fin d'Études
En vue de l'obtention du Diplôme Master académique
Option : physique des rayonnements

Thème :

Bio-élimination de la matière radioactive

Réalisé par :

HADJERSI Radhia

Encadré par :

Dr. BELLIL Wafa

Soutenu le 30/06/2025

Devant le jury composé de :

Dr. DJELLOUT Hafidha

Présidente

Dr. OULD MOHAMED Mounir

Examineur

Dr. BELLIL Wafa

Promotrice

Blida 2024/2025

Dédicace

Je dédie ce travail :

À ma mère, dont les invocations m’ont toujours accompagnée — que Dieu la protège et la préserve pour moi.

À mon père, soutien indéfectible tout au long de mon parcours — qu’Allah le récompense de la plus belle des récompenses.

À mes frères et sœurs, avec une pensée toute particulière pour ma nièce Aya, une petite battante que je n’oublie pas jamais son aide.

À mes oncles, pour leurs paroles de réconfort et de courage à chaque étape.

Et tout spécialement à mon oncle, le Professeur BENALLAL Nour El Din, dont les conseils avisés m’ont été d’un immense soutien.

À la mémoire de ma grand-mère, BENALLAL Saïda — que Dieu lui accorde Sa miséricorde. Elle attendait ce moment avec impatience. Ce mémoire lui est également dédié.

À mes précieux amis,

À mes amies de la résidence universitaire, pour chaque moment partagé avec bienveillance, complicité et soutien.

À mes collègues de Blida et de Médéa, avec une mention spéciale pour ma collègue GHELLAM ALLAH Souad, dont l’aide généreuse et le soutien indéfectible m’ont été précieux.

Enfin, à toutes celles et ceux qui, durant ces deux années, m’ont accompagnée de leur présence, de leurs encouragements ou de leurs pensées bienveillantes :

Merci, du fond du cœur.

Remerciements

Tout d'abord, louanges et remerciements sont dus à Dieu. Rien n'est possible sans sa grâce, sa réussite et sa facilité. C'est pourquoi toutes les louanges sont dues à Dieu.

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma promotrice, Madame BELLIL Wafa, pour son encadrement, sa disponibilité et ses conseils précieux tout au long de ce travail.

Je remercie également Monsieur BENALLAL Youcef, pour son soutien technique et scientifique au sein du laboratoire Physics and Radiation-Matter Interaction Laboratory (LPTHIRM), ainsi que tous les membres de ce laboratoire pour leur accueil chaleureux et leur collaboration.

Nous exprimons nos sincères remerciements à toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de ce travail, en particulier à Dr DJELLOUT Hafidha, enseignante-chercheuse en biotechnologie microbienne, pour son encadrement, ses conseils précieux et sa disponibilité Dr. DJELLOUT Hafidha, enseignante-chercheuse en biotechnologie microbienne,

Je tiens à remercier l'équipe du laboratoire de mycologie, relevant du département de Biotechnologie et Agroécologie.

En particulier Madame GHARMOULE Sabah (ingénieure en laboratoire de mycologie), pour sa précieuse aide et son encadrement lors de la partie expérimentale

Mes sincères remerciements vont également à l'ingénieure Assmaa, qui nous a fourni les solutions de métaux lourds nécessaires à notre travail, malgré les contraintes.

Je n'oublie pas d'adresser mes remerciements à l'ensemble des enseignants de l'Université de Blida 1, qui m'ont transmis leurs connaissances tout au long de mon parcours de Master,

Et sans oublier mes enseignants de l'Université de Médéa, où j'ai obtenu ma licence.

Enfin, je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire

Bioélimination de la matière radioactive

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la problématique croissante de la contamination radioactive et métallique de l'environnement, principalement due aux activités industrielles et nucléaires. Face aux limites des méthodes classiques de décontamination, il propose la bioremédiation fongique comme une alternative écologique et prometteuse. L'étude s'est focalisée sur la souche *Aspergillus niger* TBS 33, isolée des racines de palmier dattier, afin d'évaluer sa radiorésistance et sa capacité à éliminer différents polluants. Les résultats expérimentaux ont mis en évidence, d'une part, une forte tolérance de cette souche aux irradiations gamma et neutroniques, avec maintien de la viabilité et de la sporulation à des doses élevées, et d'autre part, une capacité marquée de biosorption des métaux lourds tels que le cuivre, le plomb et le cadmium, réduisant efficacement leur concentration en solution. Par ailleurs, la présence de TBS 33 a entraîné une diminution progressive de la radioactivité dans des échantillons de fertilisants NPK, suggérant un mécanisme d'adsorption ou de transformation des radionucléides. Ainsi, *Aspergillus niger* TBS 33 se révèle être une souche résistante et polyvalente, offrant un fort potentiel pour des applications en bioremédiation de sites contaminés.

Mots clés : Contamination radioactive, décontamination, bioremédiation fongique, *Aspergillus niger* TBS 33.

Bioelimination of radioactive material

Summery

This study addresses the growing issue of radioactive and heavy metal contamination in the environment, primarily caused by industrial and nuclear activities. In light of the limitations of conventional decontamination methods, it explores fungal bioremediation as an ecological and promising alternative. The study focused on the *Aspergillus niger* TBS 33 strain, isolated from date palm roots, to evaluate its radioresistance and its ability to eliminate various pollutants. Experimental results revealed, on one hand, a high tolerance of this strain to gamma and neutron irradiation, maintaining viability and sporulation even at high doses, and on the other hand, a

notable capacity for biosorption of heavy metals such as copper, lead, and cadmium, effectively reducing their concentrations in solution. Furthermore, the presence of TBS 33 led to a gradual decrease in radioactivity in samples of NPK fertilizers, suggesting a possible mechanism of adsorption or transformation of radionuclides. Thus, *Aspergillus niger* TBS 33 proves to be a resistant and versatile strain, offering strong potential for applications in the bioremediation of contaminated sites.

Keywords : Radioactive contamination, decontamination, fungal bioremediation, *Aspergillus niger* TBS 33.

الإزالة الحيوية للمادة المشعة

المُلخَص

تندرج هذه المذكرة في سياق المشكلة المتزايدة للتلوث الإشعاعي والمعدني في البيئة، الناتج أساسًا عن الأنشطة الصناعية والنووية. وبالنظر إلى محدودية طرق إزالة التلوث التقليدية، تقترح الدراسة المعالجة البيولوجية الفطرية كبديل بيئي واعد. المعزولة من جذور نخيل التمر، بهدف تقييم مقاومتها *Aspergillus niger* TBS 33 وقد تركزت الدراسة على سلالة للإشعاع وقدرتها على إزالة الملوثات المختلفة. وقد أظهرت النتائج التجريبية من جهة، تحملاً عاليًا لهذه السلالة للإشعاعات الغاما والنيوترونية مع الحفاظ على قابليتها للحياة والتكاثر حتى عند الجرعات المرتفعة، ومن جهة أخرى، قدرة ملحوظة على الامتزاز الحيوي للمعادن الثقيلة مثل النحاس والرصاص والكاديوم، مما أدى إلى خفض فعال لتركيزاتها في المحلول. كما ، مما يشير إلى احتمال حدوث آلية NPK في تقليص تدريجي للنشاط الإشعاعي في عينات من أسمدة TBS 33 ساهم وجود سلالة مقاومة ومتعددة *Aspergillus niger* TBS 33 امتصاص أو تحويل للنوكليدات المشعة. وهكذا، تُعتبر سلالة الوظائف، ما يجعلها مرشحة قوية للتطبيقات في المعالجة البيولوجية لمواقع التلوث

الكلمات المفتاحية : التلوث الإشعاعي، إزالة التلوث، المعالجة الحيوية الفطرية، *أسبيرجيلوس نيجر* TBS 33

Liste des figures

Figure 1 : (A) Réacteur de Tchernobyl et (B) réacteurs de Fukushima Daiichi.....	5
Figure 2 : Types de rayonnements électromagnétiques [70].....	7
Figure 3 : Aspet de Aspergillus Niger TBS 33.....	18
Figure 4 : Aspet de Penicillium sp.....	19
Figure 5 : Matériels utilisés.....	19
Figure 6 : Champignons utilisés.....	20
Figure 7 : Matériel pour le calcul du nombre de spores.....	20
Figure 8 : Observations post-irradiation.....	22
Figure 9 : Résultats de calculs de concentration sporale (Cellules/ml).....	24
Figure 10 : Source d'irradiation neutronique.....	32
Figure 11 : Préparation des spores.....	33
Figure 12: Effet neutronique sur la concentration cellulaire.....	38
Figure 13 : Equipment de la spectrométrie d'absorption atomique (SAA).....	50
Figure 14 : Principe de la Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA) [17].....	51
Figure 15: Matériel utilisé.....	52
Figure 16: Préparation des solutions mères stériles.....	53
Figure 17:Aspergillus Niger TBS 33.....	53
Figure 18 : incubation des disques de TBS 33 dans l'eau distille stérile avec une métaux lord.....	54
Figure 19: Etapes de Filtration, (A) avant (B)pendant (c) Apres filtration.....	54
Figure 20 : Remplissez les tubes et placez dans votre position pour l'analyse.....	55
Figure 21: graphe représente le pourcentage de la réduction des métaux lourds.....	56
Figure 22: matériel utilisée.....	59
Figure 23: Broyage d'engrais.....	60
Figure 24 : Préparation des fertilisants NPK.....	61
Figure 25 : Chaine spectrométrie Gamma utilisée.....	62
Figure 26 : Les sources de calibration.....	64
Figure 27 : Graphe de calibration (¹³⁷Cs et ⁶⁰Co).....	64
Figure 28 : Droite de calibration de l'échantillon.....	65
Figure 29: Spectre gamma a été enregistrée pour l'échantillon témoin (à t = 0).....	66
Figure 30 : Ajustement linéaire de nombre de coup pour cellule la surface du pic gamma.....	66
Figure 31: Spectre gamma a été enregistrée pour l'échantillon témoin 2.....	67
Figure 32 : Ajustement linéaire de nombre de coup pour cellule la surface du pic gamma.....	68
Figure 33 : Spectre gamma a été enregistrée pour l'échantillon TBS 33 (1 semaine).....	68
Figure 34 : Ajustement linéaire de nombre de coup pour cellule la surface du pic gamma.....	69
Figure 35 : Spectre gamma a été enregistrée pour l'échantillon TBS 33 (2 semaines).....	69
Figure 36 : Ajustement linéaire de nombre de coup pour cellule la surface du pic gamma.....	70
Figure 37: Biodégradation la matière radioactive.....	71

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1 : Propriétés des rayonnements ionisants et non ionisants [77]	7
Tableau 2: Propriétés des particules [96]	11
Tableau 3 : Calculs de concentration sporale (Cellules/ml)	24
Tableau 4 : résultats de la croissance des spores TCS34 après irradiation (face avant).....	27
Tableau 5 : Résultats de la croissance des spores après TCS 34 irradiation (face arrière).....	28
Tableau 6 : Résultats de la croissance des spores TBS34 après irradiation (face avant)	29
Tableau 7 : résultats de la croissance des spores TBS 33 après irradiation (face arrière)	30
Tableau 8: Résultats de la croissance des spores TBS 33 après irradiation neutronique	35
Tableau 9 : Observation morphologique des cultures d TBS 33	36
Tableau 10: Calculs de concentration sporale (Cellules/ml)	37
Tableau 11 : résultats de la croissance du TBS 33 dans un milieu contenant du CuSO₄	46
Tableau 12 : résultats de la croissance du TBS 33 dans un milieu contenant du CdCl₂.....	47
Tableau 13: résultats de la croissance du TBS 33 dans un milieu contenant du Pb(N₃O)₂.....	49
Tableau 14 : Concentration après l'analyse SAA et leur pourcentage de réduction	56

Liste des annexes

Liste des annexes

Annex 1 : Détail du calcul du nombre de spores à l'aide de la cellule de Malassez.....	86
Annex 2 : étalonnage des métaux lourds pour la SAA	97
Annex 3 : Les droite de calibration	100

Table des matières	
Dédicace	2
Remerciements	3
Résumé	4
Summery	4
الملخص.....	5
Liste des figures.....	6
Liste des tableaux.....	7
Liste des annexes.....	8
Table des matières	9
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Enjeux environnementaux et biologiques de l'irradiation : de l'impact nucléaire à la radiorésistance.....	4
Introduction.....	4
I. L'impact de l'énergie nucléaire sur l'environnement.....	4
II. Les types d'irradiation	6
1. Rayonnements électromagnétiques	7
2. Les rayonnements particuliers :	11
III. La découverte de la radiorésistance chez certaines espèces vivantes.....	14
1. La découverte de la radiorésistance chez les champignons	14
2. L'utilisation des champignons radiorésistants en bioremédiation.....	15
Chapitre 2 : Étude de l'effet des irradiations sur les champignons	17
Introduction.....	17
I. Effet de l'irradiation gamma sur les champignons	17
1. L'objectif :	17
2. Champignons utilisés lors de l'expérience.....	18
3. Matériel et méthodes	19
4. Irradiation	21
5. Résultats et discussion	22
II. Effet de l'irradiation neutronique sur les champignons	31
1. Objectif de l'étude.....	32

2. Matériel et méthodes	32
3. Préparation des spores	33
4. Irradiation neutronique.....	33
5. Résultats et discussions.....	34
Conclusion de chapitre	39
Chapitre 3 : Dégradation des métaux lourds	41
Introduction.....	41
1. Tolérance des souches fongiques aux métaux lourds.....	41
1. La toxicité des métaux lourds	42
2. La présence combinée des radionucléides et des métaux lourds	43
3. Tolérance des champignons aux métaux lourds	45
4. Protocole d'évaluation de la tolérance fongique aux métaux lourds	45
5. Résultats et discussion	46
II. Evaluation de la biodégradation des métaux lourds par la souche fongique	50
1. Principe de la Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA)	50
2. Matériel et réactifs	52
3. Préparation des solutions métalliques.....	53
4. Analyse du surnageant	55
Conclusion de chapitre	57
Chapitre 4 : Biodégradation de la matière radioactive	58
Introduction.....	58
1. Objectifs.....	58
2. Matériel nécessaire	58
3. Pourquoi les fertilisants.....	59
4. Préparation des fertilisants NPK.....	60
5. Mesure de la Radioactivité.....	61
6. Spectres de la radioactivité	65
7. Analyse des résultats.....	70
Conclusion générale.....	75
Perspectives	76
Références.....	77

Introduction générale

Thème : Bioélimination de la matière radioactive

Introduction générale

La contamination de l'environnement par les métaux lourds constitue une problématique environnementale et sanitaire majeure, en raison de leur forte toxicité [1-3], de leur persistance dans les écosystèmes [4-5] et de leur aptitude à s'accumuler le long de la chaîne alimentaire [6-8]. Ces polluants proviennent principalement des activités industrielles, minières et agricoles, et représentent une menace sérieuse pour la santé humaine et animale [9-11]. Parmi ces métaux, certains sont radioactifs, notamment ceux contenant des radionucléides comme l'uranium et le plutonium, dont la toxicité est particulièrement élevée [12-14].

La présence de radionucléides dans l'environnement soulève de vives inquiétudes tant écologiques que sanitaires [15]. Cette pollution radioactive peut être d'origine militaire [16], médicale [17], industrielle [18-19], ou résulter de déchets, d'essais et d'accidents nucléaires [20], et engendre des conséquences durables pour les écosystèmes et les êtres vivants [21]. Les radionucléides peuvent persister dans l'environnement pendant plusieurs décennies [22] et se disséminer dans les sols, les eaux et les organismes vivants [23-25].

Face aux limites des techniques classiques de décontamination incluent des méthodes physiques comme le décapage, le lavage à haute pression ou l'aspiration, permettant d'enlever les contaminants présents en surface. Les techniques chimiques utilisent des réactifs pour dissoudre, précipiter ou échanger les ions radioactifs, comme le lessivage chimique ou l'extraction par échange d'ions. D'autres approches, comme la vitrification ou l'incinération, exploitent la chaleur pour immobiliser ou détruire les substances dangereuses. Enfin, des méthodes mécaniques telles que l'excavation ou le recouvrement permettent de confiner ou d'extraire les matériaux contaminés. Bien que ces procédés soient efficaces, ils présentent souvent des limites en termes de coût, d'impact environnemental et de complexité d'application, ce qui justifie la recherche d'alternatives plus durables comme la bioremédiation [26-28]. Les approches biologiques, telles que la bioremédiation, apparaissent comme des alternatives prometteuses. Cette technique repose sur l'utilisation d'organismes vivants capables de dégrader, d'absorber ou de transformer les polluants [29-32]. Parmi ces organismes, les champignons présentent un intérêt particulier pour l'élimination des substances radioactives [33-34]. Leur réseau mycélien

Introduction générale :

étendu, leur résistance aux conditions extrêmes et leur capacité à interagir avec divers composés métalliques et radioactifs leur confèrent un fort potentiel de biosorption [35-37].

Certaines espèces dites radiotrophes, capables d'utiliser les radiations comme source d'énergie, ont suscité un intérêt croissant pour la dépollution des sites contaminés [38]. Ce phénomène a été observé notamment après l'accident de Tchernobyl en 1986, où plusieurs espèces de champignons ont été retrouvées sur les parois du réacteur endommagé [39-41]. Certaines de ces espèces montraient une croissance stimulée par la radioactivité, grâce à la présence de mélanine, un pigment jouant un rôle protecteur contre les radiations [42-44]. Ces observations ont marqué un tournant dans l'étude de la radiorésistance fongique [45].

À partir des années 2000, les recherches se sont intensifiées afin de comprendre les mécanismes moléculaires impliqués dans la résistance des champignons à la radioactivité et leur aptitude à accumuler des métaux lourds ou radionucléides [46]. Des travaux en laboratoire ont montré que certaines espèces telles que *Aspergillus Niger TBS 33*, *Penicillium sp* et *Rhizopus arrhizus* peuvent adsorber des éléments radioactifs comme l'uranium, le césium ou le strontium [47-51]. Après l'accident nucléaire de Fukushima en 2011, l'intérêt pour les solutions biologiques de décontamination s'est renforcé [52]. Des études ont alors porté sur des espèces locales capables de capter les radionucléides présents dans les sols et les eaux, et des « biomatériaux fongiques » ont été envisagés pour filtrer les eaux contaminées [53].

Aujourd'hui, certaines expérimentations menées sur des sols simulés ont permis de tester des champignons comme *Pleurotus ostreatus* (champignon huître) pour leur capacité à fixer le césium-137 et l'uranium [54]. L'utilisation des champignons dans la décontamination radioactive représente un domaine de recherche innovant et prometteur, intégrable dans des stratégies de dépollution écologique [55-58].

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire, dont l'objectif principal est d'étudier l'effet des irradiations sur des champignons sélectionnés, leur radiorésistance, ainsi que leur capacité à biosorber ou biodégrader les métaux lourds et radionucléides. Ce travail repose sur une approche interdisciplinaire, alliant la physique des rayonnements et la biotechnologie microbienne. Il est le fruit d'une collaboration entre :

Introduction générale :

Dr. BELLIL Wafa, enseignante-chercheuse en physique, encadrant l'étudiante HADJERSI Radia, et Dr. DJELLOUT Hafidha, enseignante-chercheuse en biotechnologie microbienne, encadrant le binôme HADJ MIHOUB SIDI MOUSSA Nesrine et SAADI Zineb Ines.

Cette synergie entre disciplines a permis de combiner des compétences complémentaires, cruciales pour la réalisation expérimentale du projet. Membre du Laboratoire de Valorisation des Ressources Agrobiologiques (LVRA) de l'Université Saad Dahlab de Blida, Dr DJELLOUT a isolé ces dernières années plusieurs souches fongiques à partir des racines du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) en Algérie. Les souches, identifiées selon des critères morphologiques, appartiennent notamment aux genres *Aspergillus* et *Penicillium*, référencées respectivement sous les codes TBS 33 et TCS 34.

Les objectifs de ce mémoire s'articulent autour de trois axes principaux :

1. Étudier les effets des irradiations (rayons gamma et neutrons) sur les souches sélectionnées ;
2. Évaluer la résistance aux métaux lourds et la capacité de dégradation ou d'immobilisation de ces contaminants ;
3. Explorer l'interaction avec des substances radioactives, afin d'ouvrir la voie à leur utilisation en bioremédiation des milieux contaminés.

Chapitre 1

**Enjeux environnementaux et biologiques
de l'irradiation : de l'impact nucléaire à
la radiorésistance**

Chapitre 1 : Enjeux environnementaux et biologiques de l'irradiation : de l'impact nucléaire à la radiorésistance

Introduction

L'énergie nucléaire représente un pilier majeur de la production énergétique moderne. Cependant, cette technologie soulève d'importantes préoccupations environnementales, notamment en raison des effets potentiels des rayonnements ionisants sur les écosystèmes et la santé humaine. L'impact environnemental du nucléaire ne se limite pas aux accidents majeurs, comme ceux de Tchernobyl ou Fukushima, mais englobe également la gestion des déchets radioactifs, les émissions de radionucléides, et la contamination des sols et des eaux autour des sites nucléaires. La connaissance des différents types d'irradiation et ces effets sur la matière est essentiel pour évaluer les risques liés aux expositions aiguës ou chroniques. Cependant certaines espèces vivantes présente une certaine radiorésistance ou les effets connus des irradiations ionisantes ne s'applique pas sur ces organismes. Ce premier chapitre mettre en lumière les enjeux écologiques de l'énergie nucléaire, la nature des irradiations, et les réponses biologiques extrêmes développées par certains êtres vivants face à cette contrainte.

I. L'impact de l'énergie nucléaire sur l'environnement

L'énergie nucléaire, bien qu'efficace pour produire de l'électricité à grande échelle, elle joue un rôle fondamental et bénéfique dans un domaine médicale. Grâce aux propriétés des rayonnements ionisants, la médecine nucléaire permet de diagnostiquer et de traiter de nombreuses maladies, en particulier le cancer. Cette même énergie nucléaire présente des risques considérables en cas d'accident. Dans l'histoire, plusieurs catastrophes nucléaires majeures ont provoqué des dégâts irréversibles sur l'environnement et la santé humaine [59]. Ces conséquences ne se limitent pas à un événement ponctuel mais ils laissent une trace profonde et durable sur le sols, eaux, air, faune et flore peuvent rester contaminés pendant des générations.

Sur le plan environnemental, la libération massive de substances radioactives contamine durablement :

- ✓ L'air : Les nuages radioactifs se déplacent avec le vent, contaminant des régions entières, même loin du site initial (par exemple le nuage de Tchernobyl a touché toute l'Europe). La radioactivité ne modifie pas le climat global, mais altère durablement la qualité de l'air local)
- ✓ Les sols : Les particules radioactives retombent sur les sols après l'explosion ou la fuite. (Le césium-137 ou le strontium-90) pénètrent dans la terre et y restent actifs pendant des dizaines d'années. Cette contamination rend l'agriculture impossible dans certaines zones stérilise des végétations mutées ou absentes.
- ✓ Les ressources en eau : Les nappes d'eaux phréatiques, les rivières et parfois même les océans sont contaminés. À Fukushima, de grandes quantités d'eau radioactive ont été rejetées dans le Pacifique, affectant la faune marine [60-62].

Sur le plan écologiquement, les écosystèmes sont gravement perturbés : la faune et la flore subissent des effets directs de la radioactivité, comme la baisse de la biodiversité, des mutations génétiques chez certaines espèces, et la disparition de nombreuses formes de vie dans les zones les plus touchées. À Tchernobyl, par exemple, plusieurs espèces animales ont connu des anomalies biologiques et des troubles de reproduction [60-63].

Sur le plan humain, les conséquences sont tout aussi alarmantes : augmentation significative des cancers (notamment de la thyroïde), malformations congénitales chez les nouveau-nés, maladies chroniques, sans compter l'impact psychologique sur les populations évacuées, souvent traumatisées et déplacées de force [60-64].



A



B

Figure 1 : (A) Réacteur de Tchernobyl et (B) réacteurs de Fukushima Daiichi

Donc comme conclusion les accidents nucléaires libèrent dans l'environnement une grande quantité de substances radioactives émettant différents types de rayonnements. Chaque type d'irradiation a des effets spécifiques sur la santé humaine et les écosystèmes, en fonction de sa nature, de son pouvoir de pénétration, et de sa capacité à ioniser la matière vivante. Dans la partie suivante on va détailler les types d'irradiation et les effets spécifiques de cette dernière sur la matière.

II. Les types d'irradiation

L'exposition d'un objet, d'un organisme ou d'une matière à un rayonnement énergétique émis par une source naturelle ou artificielle dite « irradiation ». Ce phénomène est omniprésent dans notre environnement, que ce soit sous forme de lumière solaire, de rayonnements médicaux ou encore d'émissions issues de substances radioactives. Selon la nature du rayonnement, ses propriétés physiques et ses effets sur la matière, on distingue plusieurs types d'irradiation. Les irradiations peuvent être classées en deux grandes catégories : les rayonnements électromagnétiques (comme les rayons X, gamma ou ultraviolets) et les rayonnements particuliers (comme les particules alpha, bêta ou les neutrons) [65-69].

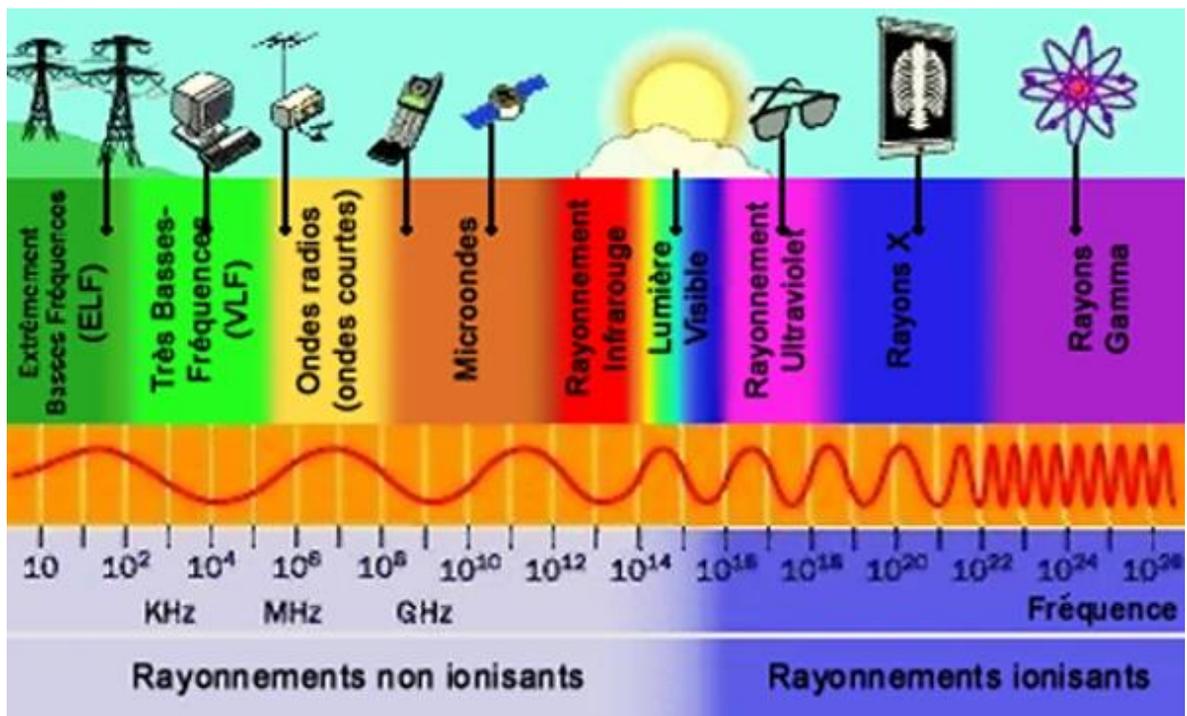


Figure 2 : Types de rayonnements électromagnétiques [70]

1. Rayonnements électromagnétiques

1.1 Propriétés physiques et effets sur la matière.

Les rayonnements électromagnétiques sont des ondes composées d'un champ électrique et d'un champ magnétique oscillant perpendiculairement l'un à l'autre et à la direction de propagation. Ils se déplacent à la vitesse de la lumière dans le vide (environ 300 000 km/s) et dont l'énergie est proportionnelle à la fréquence : $E = h \cdot f$ ($h =$ constante de Planck). Tel que la fréquence représente le nombre d'oscillations par seconde (Hz). Comme illustre la figure 2[71,72].

Selon l'énergie et de la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique on définit « Le pouvoir de pénétration ». Plus un rayonnement est énergétique, plus il peut traverser des matériaux denses. Les rayons gamma, très énergétiques et à faible longueur d'onde, possèdent le pouvoir de pénétration le plus élevé : ils peuvent traverser plusieurs centimètres de plomb ou des dizaines de centimètres de béton [73,74]. Les rayons X, proches des gammas sur le spectre, ont également une forte capacité à pénétrer les tissus humains, ce qui explique leur utilisation en imagerie médicale [75]. En revanche, les ultraviolets (UV), bien qu'énergétiques, sont arrêtés par les couches superficielles de la peau ou par le verre. Enfin, les rayonnements de faible énergie, comme les infrarouges ou les ondes radio, ont un pouvoir de pénétration très limité et ne traversent que des matériaux peu denses. Cette variation du pouvoir de pénétration rend chaque type de rayonnement électromagnétique utile dans des domaines bien spécifiques, mais aussi plus ou moins dangereux pour la santé selon l'exposition [76]. Le tableau 1 présent quelques propriétés des rayonnements :

Tableau 1 : Propriétés des rayonnements ionisants et non ionisants [77]

Type	Longueur d'onde	Énergie des photons	Ionisant
Infrarouge (IR)	700 nm – 1 mm	Faible	✗ Non
Lumière visible	400 – 700 nm	Moyenne	✗ Non
Ultraviolet (UV)	10 – 400 nm	Moyenne à élevée	✓ Partiellement
Rayons X	0.01 – 10 nm	Élevée	✓ Oui

Rayons gamma (γ)	< 0.01 nm	Très élevée	<input checked="" type="checkbox"/> Oui
---------------------------	-----------	-------------	---

1.2 Effets des rayonnements ionisants sur la matière

Les rayonnements ionisants exercent des effets variés sur la matière, influencés par leur nature physique, leur énergie et leur capacité à ioniser les atomes. Parmi ces rayonnements figurent les UV, les gamma et les neutrons, qui se distinguent par leurs modes d'interaction avec la matière. Les ultraviolets (UV), rayonnements électromagnétiques de faible à moyenne énergie, sont émis naturellement par le soleil ou produits par certaines sources artificielles, comme les lampes germicides [78,79].

a. Les Ultraviolet (UV)

Les UV se divisent en trois catégories selon leur longueur d'onde : UV-A, UV-B et UV-C, chacun ayant des effets distincts sur la matière et les tissus biologiques.

➤ UV-A (315 – 400 nm)

Les UV-A sont les moins énergétiques mais les plus pénétrants. Présents en grande quantité à la surface terrestre, ils causent des effets cumulatifs à long terme :

- Sur la peau : vieillissement prématuré, perte d'élasticité, altération du collagène.
- Sur les matériaux : photodégradation, décoloration, fragilisation des plastiques.
Ces effets sont accentués par l'exposition prolongée, d'où l'usage de revêtements anti-UV [80].

➤ UV-B (280 – 315 nm)

Plus énergétiques que les UV-A, les UV-B sont partiellement filtrés par l'ozone, mais ont un impact plus direct :

- Sur les tissus vivants : lésions de l'ADN, mutations, coups de soleil, photokératite, risques accrus de mélanome.
- Sur les matériaux : dégradation accélérée des plastiques, peintures, textiles exposés au soleil.
D'où l'utilisation d'additifs anti-UV dans de nombreux produits industriels [81].

➤ **UV-C (100 – 280 nm)**

Les plus énergétiques et les plus dangereux, les UV-C sont absorbés naturellement par l'atmosphère. Ils sont toutefois générés artificiellement pour des usages germicides :

- Sur les organismes : destruction de l'ADN/ARN des microbes, mais aussi brûlures cutanées et lésions oculaires sévères chez l'humain.
- Sur les matériaux : dégradation rapide des plastiques, opacification, fragilisation des polymères et caoutchoucs [82].

b. Les rayons X (RX)

Les rayons X sont une forme de rayonnement électromagnétique de haute énergie, situés entre les ultraviolets et les rayons gamma dans le spectre électromagnétique. Les rayons X sont capables de traverser la matière, en particulier les tissus mous, ce qui en fait un outil précieux dans les domaines médical, industriel et scientifique [83].

Produits généralement par des dispositifs appelés tubes à rayons X, ces rayonnements sont générés lorsque des électrons, accélérés à grande vitesse, frappent une cible métallique. L'interaction de ces électrons avec les atomes de la cible produit une émission de rayons X par deux mécanismes principaux : le freinage (rayonnement de freinage ou Bremsstrahlung) et l'émission caractéristique [84].

Lorsqu'ils interagissent avec la matière, les rayons X peuvent provoquer des phénomènes d'ionisation et d'excitation des atomes. Ces interactions modifient les propriétés physiques, chimiques ou biologiques des matériaux traversés. La profondeur de pénétration et l'intensité des effets dépendent de l'énergie des rayons X et de la densité de la matière.

Les effets des rayons X sur la matière sont nombreux. Sur le plan physique, ils permettent l'imagerie et l'analyse des structures internes sans destruction. Sur le plan chimique et biologique, ils peuvent altérer les molécules, provoquer la formation de radicaux libres, endommager l'ADN, et, à fortes doses, entraîner des effets nocifs sur les tissus vivants, tels que des mutations ou des cancers [85].

c. Les rayons Gamma (R γ) :

Les rayonnements gamma (γ) sont des ondes électromagnétiques de très haute fréquence et d'énergie élevée, généralement émis par des noyaux radioactifs lors de désintégrations nucléaires. Contrairement aux particules alpha et bêta, les rayons gamma n'ont ni masse ni

charge électrique, ce qui leur confère un fort pouvoir de pénétration et une capacité à traverser des matériaux denses comme le béton ou le plomb (bien qu'avec atténuation).

Lorsqu'ils interagissent avec la matière, les rayons gamma ne déposent pas leur énergie directement de manière uniforme, mais à travers des processus d'interaction spécifiques. Ces interactions produisent des effets physiques, chimiques et biologiques importants [86].

Mécanismes d'interaction dans la matière

Les rayons gamma interagissent principalement avec les électrons des atomes par trois mécanismes :

- **Effet photoélectrique** : le photon gamma transfère toute son énergie à un électron, qui est alors éjecté de son atome (ionisation).
- **Effet Compton** : le photon entre en collision avec un électron, lui transmet une partie de son énergie et continue sa trajectoire avec une énergie réduite.
- **Création de paires** : si l'énergie du photon est supérieure à 1,022 MeV, il peut se transformer en une paire électron-positon lorsqu'il passe à proximité d'un noyau.

Ces interactions peuvent ioniser la matière, exciter les atomes ou entraîner des transformations énergétiques dans les matériaux traversés [87,88].

➤ **Effets physiques**

- Ionisation : production d'ions et d'électrons libres dans les matériaux, ce qui peut modifier leurs propriétés électriques (effet exploité dans les détecteurs de radiation).
- Échauffement : l'absorption de l'énergie des rayons gamma peut provoquer un léger échauffement localisé, notamment dans des matériaux sensibles.
- Défauts cristallins : dans les solides (métaux, céramiques), les rayonnements gamma peuvent déplacer des atomes de leur réseau cristallin, créant des défauts qui affaiblissent la structure du matériau [89].

➤ **Effets chimiques**

Les rayons gamma peuvent rompre les liaisons chimiques, entraînant :

- La formation de radicaux libres, très réactifs, qui peuvent modifier la composition chimique des matériaux.
- La dégradation ou polymérisation de certains composés organiques ou polymères.
- L'activation chimique ou radiolytique de l'eau, générant des espèces oxydantes ($\text{OH}\cdot$, H_2O_2), responsables d'effets secondaires dans les milieux biologiques [90,91].

➤ **Effets biologiques**

Même s'ils n'ont pas de charge, les rayons gamma peuvent causer des dommages graves aux tissus vivants par l'ionisation indirecte (via radicaux libres) :

- Dommages à l'ADN, mutations
- Risques de cancers
- Mort cellulaire (effet exploité en radiothérapie) [92,93]

2. Les rayonnements particuliers :

Les rayonnements particuliers sont constitués de particules matérielles se déplaçant à grande vitesse. Contrairement aux rayonnements électromagnétiques (comme les rayons X ou gamma), ils ont une masse, parfois une charge électrique, et interagissent fortement avec la matière. Ces rayonnements proviennent généralement de phénomènes radioactifs, de réactions nucléaires ou de dispositifs d'accélération de particules [94].

On distingue principalement plusieurs types de rayonnements particuliers : particules alpha (α), particules bêta (β^- et β^+), protons, neutrons, et ions lourds [95].

Tableau 2: Propriétés des particules [96]

Type de particule	Charge	Masse (u.m.a)	Pouvoir pénétrant
Particule alpha (α)	+2	4	Très faible (quelques cm dans l'air)
Particule bêta (β^-/β^+)	∓ 1	(1/1836)	Moyen (quelques mm dans les tissus)
Proton	+1	1	Moyen
Neutron	0	1	Très élevé (pénètre profondément)
Ions lourds	+Z	Selon Z	Faible à moyen

2.1 Effets des rayonnements particuliers sur la matière

Les rayonnements particuliers, comprenant principalement les particules alpha (α), bêta (β) et les neutrons, interagissent avec la matière selon des mécanismes distincts de ceux des rayonnements électromagnétiques [97]. Lorsqu'ils atteignent une matière solide, ces rayonnements provoquent des effets variables tels que

a) Effets physiques

- Ionisation directe : les particules chargées (α , β , protons, ions lourds) interagissent fortement avec les électrons des atomes, provoquant une ionisation intense sur leur trajectoire [98].
- Excitation des atomes, pouvant entraîner des modifications d'état électronique ou des émissions de lumière (scintillation) [99].
- Dépôt d'énergie élevé : en particulier pour les particules alpha et les ions lourds, ce qui peut endommager les matériaux solides à l'échelle microscopique [100].
- Chauffage localisé dans certains milieux (notamment en radiothérapie ou en microélectronique) [101].

b) Effets chimiques

- Rupture de liaisons chimiques : en particulier dans les matériaux organiques ou biologiques.
- Formation de radicaux libres (surtout dans l'eau ou les tissus vivants), ce qui peut entraîner des réactions chimiques secondaires.
- Modification de la structure chimique des polymères, de l'ADN ou des membranes cellulaires [102,104].

c) Effets sur les matériaux solides

- Création de défauts cristallins : par déplacement d'atomes du réseau (surtout par neutrons ou ions lourds).
- Activation nucléaire : certaines particules (notamment les neutrons) peuvent rendre un matériau radioactif en modifiant ses noyaux.
- Dégradation mécanique : fatigue, fragilisation ou gonflement de matériaux irradiés, en particulier dans les réacteurs nucléaires [105,107].

2.2 Effets des neutrons sur la matière

Les neutrons sont des particules subatomiques neutres (sans charge électrique) qui possèdent une masse équivalente à celle du proton. En raison de leur neutralité, ils ne subissent pas d'interactions électromagnétiques directes avec les électrons des atomes, mais ils interagissent fortement avec les noyaux atomiques. Ces interactions ont des conséquences physiques, chimiques et nucléaires importantes sur la matière [108,109].

➤ **Effets physiques des neutrons sur la matière**

- Déplacement atomique : les neutrons peuvent éjecter des atomes de leur position dans un cristal → formation de défauts, dislocations, et modifications des propriétés mécaniques.
- Fragilisation des matériaux : les matériaux exposés à long terme à un flux neutronique (ex : cuves de réacteurs) deviennent plus cassants.
- Gonflement des matériaux : accumulation de gaz (hydrogène, hélium) issus de transmutations nucléaires [110,111].

➤ **Effets chimiques et nucléaires**

- Transmutation nucléaire : transformation d'un noyau en un autre par capture de neutrons.
- Activation radioactive : les matériaux exposés aux neutrons peuvent devenir radioactifs (ex : fer → cobalt-60).
- Formation de produits secondaires toxiques ou instables, ce qui complique le stockage des matériaux irradiés [112,114].

Les neutrons, bien qu'invisibles et électriquement neutres, ont des effets puissants et souvent destructeurs sur la matière. Leur capacité à provoquer des réactions nucléaires, à modifier la structure des matériaux et à activer des éléments en fait un sujet crucial dans les domaines de l'énergie nucléaire, de la radioprotection, et des technologies de pointe [115,116].

Les neutrons sont présents dans de nombreuses situations, notamment dans les réacteurs nucléaires, les sources radioactives (ex. : californium-252) et dans certains accélérateurs de particules [117].

2.3 Types d'interaction des neutrons avec la matière

Les neutrons interagissent principalement par des réactions nucléaires, qui dépendent de leur énergie (neutrons thermiques, rapides ou rapides relativistes) :

a) Diffusion élastique

- Le neutron entre en collision avec un noyau sans changement de nature du noyau.
- Il perd une partie de son énergie, qui est transférée au noyau sous forme de recul (échauffement).

- Effet important dans les modérateurs de réacteurs nucléaires (ex : eau, graphite).

b) Diffusion inélastique

- Le neutron excite le noyau qu'il frappe.
- Le noyau libère ensuite l'excédent d'énergie sous forme de rayonnement gamma.

c) Capture neutronique (réaction (n, γ))

- Le noyau capture un neutron et devient instable : il se transforme en un isotope radioactif.
- Cela conduit à une activation de la matière (danger pour la radioprotection).

d) Fission induite

- Certains noyaux lourds (comme l'uranium-235) peuvent se scinder en deux fragments, libérant d'autres neutrons et de l'énergie.
- Processus fondamental dans la production d'énergie nucléaire [118].

III. La découverte de la radiorésistance chez certaines espèces vivantes

L'étude des effets biologiques de l'irradiation a conduit à des découvertes fascinantes sur la capacité de certaines espèces à résister à des doses très élevées de rayonnements ionisants, bien supérieures à celles tolérées par l'homme. Cette radiorésistance a été observée notamment chez des bactéries comme *Deinococcus radiodurans*, surnommée « la bactérie la plus résistante au monde », capable de survivre à des doses dépassant 5 000 grays, contre environ 5 grays létaux pour l'être humain. De même, certaines espèces d'insectes (comme les cafards), d'archées ou même de tardigrades présentent une résistance exceptionnelle [119]. Ces organismes possèdent des mécanismes biologiques très efficaces de réparation de l'ADN, de protection contre les radicaux libres, et de stabilisation des structures cellulaires après irradiation. Ces découvertes ont non seulement enrichi la compréhension des effets différenciés des rayonnements sur le vivant, mais ont aussi ouvert la voie à des recherches en biotechnologie, radioprotection et exploration spatiale, où la maîtrise de la résistance aux radiations est un enjeu clé [120,121].

1. La découverte de la radiorésistance chez les champignons

La découverte de la radiorésistance chez les champignons a ouvert un nouveau champ d'étude dans le domaine de la biologie des radiations. Cette propriété a été particulièrement mise en évidence après l'accident nucléaire de Tchernobyl (1986), où des scientifiques ont observé la croissance inattendue de certaines espèces de champignons noirs sur les murs fortement irradiés du réacteur endommagé. Parmi ces espèces figurent des champignons mélanisés tels que

« *Cladosporium sphaerospermum* » ou « *Cryptococcus neoformans* ». Ces organismes possèdent une forte concentration de mélanine dans leur paroi cellulaire, un pigment qui jouerait un rôle clé dans leur résistance. Il a été proposé que la mélanine n'absorbe pas seulement les rayonnements ionisants, mais puisse également convertir l'énergie des radiations en énergie chimique, un processus parfois appelé « radiosynthèse », analogue à la photosynthèse [122]. Ce phénomène exceptionnel suggère que certains champignons ne se contentent pas de survivre dans des environnements hautement radioactifs, mais pourraient même utiliser cette énergie pour croître. Ces découvertes suscitent un intérêt croissant dans les domaines de la bioremédiation, de la protection contre les radiations, et même pour la survie dans l'espace, où des organismes radiorésistants pourraient être utiles pour l'exploration de planètes hostiles [123,124].

2. L'utilisation des champignons radiorésistants en bioremédiation

Les champignons mélanisés capables de résister à des environnements hautement radioactifs suscitent un intérêt croissant dans le domaine de la bioremédiation, c'est-à-dire l'utilisation d'organismes vivants pour dépolluer des sites contaminés. Grâce à leur capacité à croître dans des zones irradiées, comme les zones autour de Tchernobyl ou de Fukushima, ces champignons peuvent être utilisés pour absorber, piéger ou transformer des éléments radioactifs. La mélanine qu'ils produisent joue un rôle clé : non seulement elle protège la cellule, mais elle peut aussi fixer des radionucléides comme l'uranium, le césium ou le strontium, en les liant à sa structure moléculaire [124,125]. De plus, certains champignons ont la capacité remarquable de décomposer des substances organiques toxiques présentes dans les sols contaminés, ce qui contribue à réhabiliter les écosystèmes dégradés. Cette action repose sur leur puissant système enzymatique : les champignons sécrètent des enzymes extracellulaires, comme les lignines, peroxydases et laccases, capables de dégrader des molécules complexes, souvent résistantes à la biodégradation classique. Parmi ces composés figurent des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), des pesticides, des solvants industriels, et même des plastiques biodégradables [126,127].

Ces processus sont particulièrement efficaces en milieu contaminé, car les champignons peuvent pénétrer en profondeur dans les substrats solides grâce à leur réseau de mycélium, atteignant ainsi les polluants enfouis. En combinant leur tolérance à des conditions extrêmes (acidité, toxicité, sécheresse) et leur aptitude à transformer chimiquement les polluants, ils participent

activement à restaurer la biodiversité microbienne du sol, à réduire la toxicité globale de l'environnement et à favoriser le retour de la flore et de la faune locales [128].

Ces propriétés font des champignons un outil prometteur de mycoremédiation, une branche spécialisée de la bioremédiation, qui pourrait être intégrée à grande échelle dans les stratégies de restauration des zones industrielles, minières ou nucléaires contaminées.

Grâce à leur résilience extrême, ces champignons représentent une solution écologique, durable et peu coûteuse pour traiter des environnements où les méthodes classiques (décontamination chimique, excavation) sont difficiles, dangereuses ou très onéreuses. À long terme, la recherche vise même à ingénieriser ces champignons pour augmenter leur efficacité, voire les adapter à des missions spatiales de nettoyage de surfaces irradiées sur la Lune ou Mars [129-132].

Chapitre 2 :

Effets des irradiations sur les champignons

Chapitre 2 : Étude de l'effet des irradiations sur les champignons

Introduction

L'irradiation est une technique largement utilisée dans les domaines de la conservation des aliments, de la stérilisation biologique et de la recherche en biotechnologie. Elle repose sur l'utilisation de rayonnements ionisants pour induire des modifications génétiques, inhiber la croissance microbienne ou stériliser des matériaux biologiques.

Parmi les nombreux types de rayonnements, deux catégories sont principalement utilisées :

Les rayonnements électromagnétiques, comme les rayons gamma, sont réputés pour leur fort pouvoir de pénétration et leur capacité à traverser les tissus biologiques sans produire de chaleur.

Les rayonnements particuliers, tels que les neutrons, interagissent avec la matière biologique de manière à provoquer des cassures dans l'ADN et des mutations profondes, en raison de leur forte capacité d'ionisation indirecte.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la résistance relative des deux souches fongiques après exposition à des doses croissantes de rayonnements gamma et neutroniques, afin d'identifier celle présentant la plus grande tolérance à l'irradiation.

I. Effet de l'irradiation gamma sur les champignons

1. L'objectif :

L'irradiation gamma, en raison de son fort pouvoir de pénétration, est largement utilisée pour désinfecter les surfaces, stériliser les matériaux biologiques et inhiber la croissance microbienne. Chez les champignons, ce type de rayonnement induit principalement des dommages à l'ADN, tels que des cassures simples et double brin, ainsi que des altérations des bases azotées. Ces lésions peuvent perturber la division cellulaire, inhiber la croissance des mycéliums et affecter la viabilité des spores.

La sensibilité des champignons à l'irradiation gamma dépend de plusieurs facteurs, notamment l'espèce, le stade de développement, la concentration cellulaire, et les conditions environnementales (humidité, température, etc.). *Aspergillus Niger* TBS 33 est connu pour sa capacité à résister à des doses relativement élevées de rayonnements, tandis que *Penicillium* sp présente généralement une tolérance plus faible [133,134].

L'analyse de la croissance post-irradiation permet ainsi d'estimer la dose létale et de comparer la résilience des deux souches fongiques exposées.

2. Champignons utilisés lors de l'expérience

Deux genres fongiques ont été sélectionnés pour cette étude en raison de leur importance en microbiologie environnementale et industrielle, ainsi que de leur sensibilité potentielle à l'irradiation gamma :

- **Aspergillus Niger TBS 33**

Champignon filamenteux appartenant à la division des Ascomycètes, largement répandu dans les environnements riches en matières organiques. Il est connu pour sa capacité à produire des enzymes industrielles, ainsi que pour sa résistance relative à divers stress environnementaux. *Aspergillus TBS 33 a* également été associé à la production de mélanine, pigment potentiellement impliqué dans la protection contre les rayonnements ionisants [135].



Figure 3 : Aspect de Aspergillus

- **Penicillium sp**

Genre également classé parmi les Ascomycètes, fréquemment retrouvé dans les sols, denrées alimentaires et environnements humides. Certaines espèces de *Penicillium* sont utilisées en biotechnologie (antibiotiques, enzymes), tandis que d'autres peuvent présenter une sensibilité

marquée aux agents oxydants. L'espèce exacte utilisée dans cette expérience n'a pas été déterminée au niveau moléculaire, mais elle a été identifiée morphologiquement selon des critères classiques (forme des conidies, aspect du mycélium, croissance sur PDA) [136,137].

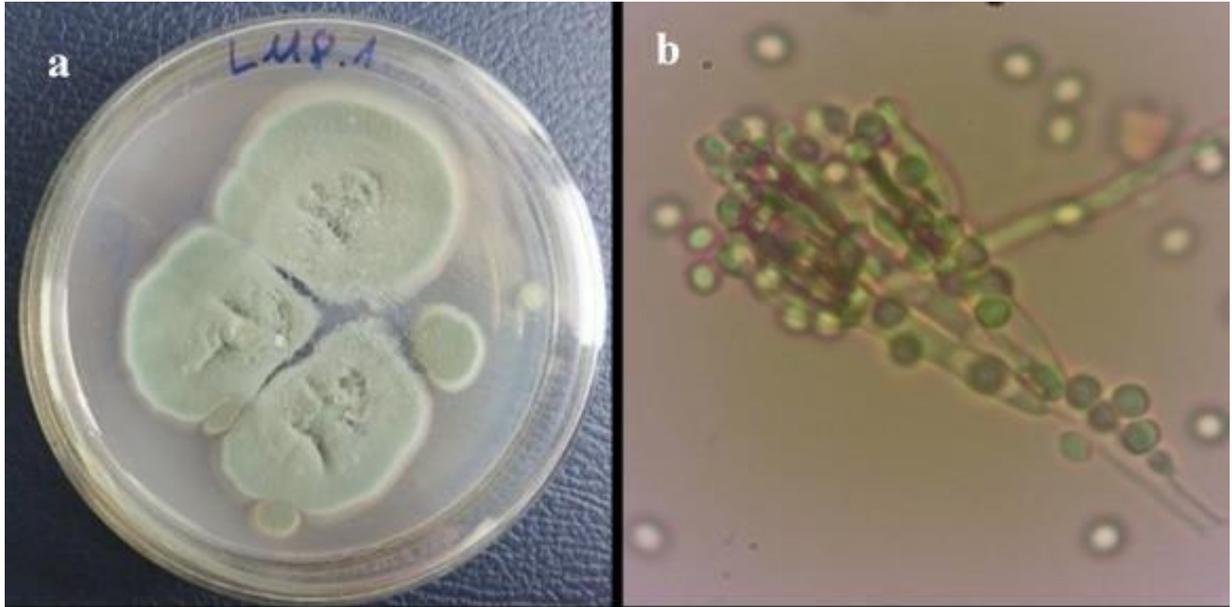


Figure 4 : Aspect de Penicillium

3. Matériel et méthodes

Notre expérience a été menée au niveau du laboratoire de **mycologie**, relevant du département de **Biotechnologie et Agroécologie**.



Vortex



Autoclave

Figure 5 : Matériels utilisés

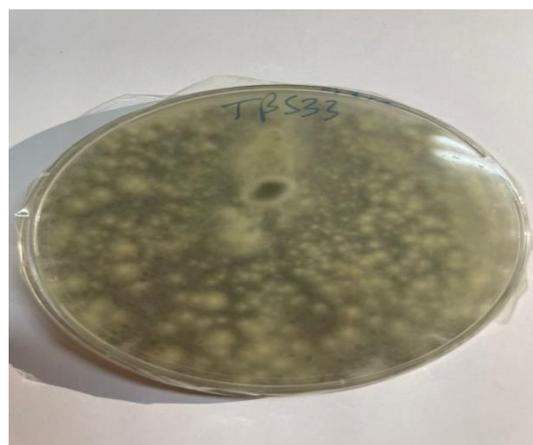
Chapitre 2 : Effets des irradiations sur les champignons

Des champignons frais appartenant à deux espèces fongiques (*Aspergillus Niger* TBS 33 sous le code **TBS 33** et *Penicillium* sp avec le code **TCS 34**). Les souches ont été conservées à 4 °C dans une chambre froide jusqu'à leur utilisation.

Les inoculations ont été effectuées sur milieu nutritive liquide dans des tubes à essai stériles.



TBS 33



TCS 34

Figure 6 : Champignons utilisés



Figure 7 : Matériel pour le calcul du nombre de spores

4. Irradiation

Pour procéder à l'irradiation des échantillons, ceux-ci ont été placés dans des tubes à essai hermétiques, mais perméables aux radiations, afin d'assurer une exposition homogène tout en évitant toute contamination extérieure. Chaque tube a ensuite été irradié avec une dose gamma spécifique. L'utilisation systématique d'un dosimètre a permis de vérifier la dose effectivement absorbée par les échantillons, garantissant ainsi la fiabilité et la reproductibilité des résultats [138,139].

L'irradiation gamma a été réalisée à l'aide d'une source radioactive standard au sein du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA). Chaque condition expérimentale comprenait un minimum de trois répétitions indépendantes. Les doses appliquées étaient les suivantes :

- **Témoin** : non irradié (0 kGy)
- **Faible dose** : 0,5 kGy
- **Dose moyenne** : 1,0 kGy
- **Haute dose** : 2,0 kGy
- **Très haute dose** : 5,0 kGy

Cette répartition a permis d'analyser l'effet dose-dépendant de l'irradiation gamma sur les caractéristiques biologiques et morphologiques des champignons étudiés.

Après irradiation, tous les tubes ont été conservés à 4 °C dans des conditions strictement identiques afin de prévenir toute altération post-traitement. Les échantillons ont ensuite été incubés dans un incubateur à température contrôlée (25–28 °C), et les croissances fongiques ont été suivies de manière régulière.

Le dénombrement des spores a été réalisé à l'aide d'une cellule de Malassez (méthode décrite ultérieurement), permettant d'estimer avec précision la concentration sporale dans les suspensions préparées.

Pour évaluer la viabilité des spores après irradiation, une croissance des champignons a été effectuée sur un milieu de culture nutritif, la gélose dextrosée à la pomme de terre (*Potato Dextrose Agar*, PDA), préparé à partir d'une infusion de pomme de terre et de dextrose. Ce milieu a permis d'observer la capacité des spores à germer et à développer un mycélium

actif. Des observations visuelles ont été réalisées à différents intervalles (0, 7, 15, et 30 jours) afin d'évaluer l'effet de l'irradiation sur la viabilité et le développement des spores.

5. Résultats et discussion

a) Observations post-irradiation

Après l'irradiation, un changement de couleur net a été observé dans tous les tubes contenant *Aspergillus Niger TBS 33*, quelle que soit la dose de rayonnement appliquée. Le contenu de ces tubes a viré au brun foncé, avec une intensification progressive de la couleur à mesure que la dose augmentait. (Comme illustre la figure 2.4). En revanche, le tube témoin non irradié de *Aspergillus Niger TBS 33* est resté inchangé, conservant un aspect clair. À l'opposé, aucune modification visuelle n'a été constatée dans les tubes contenant *Penicillium* sp., y compris à la dose maximale de 5 kGy ; le tube témoin est également demeuré stable.

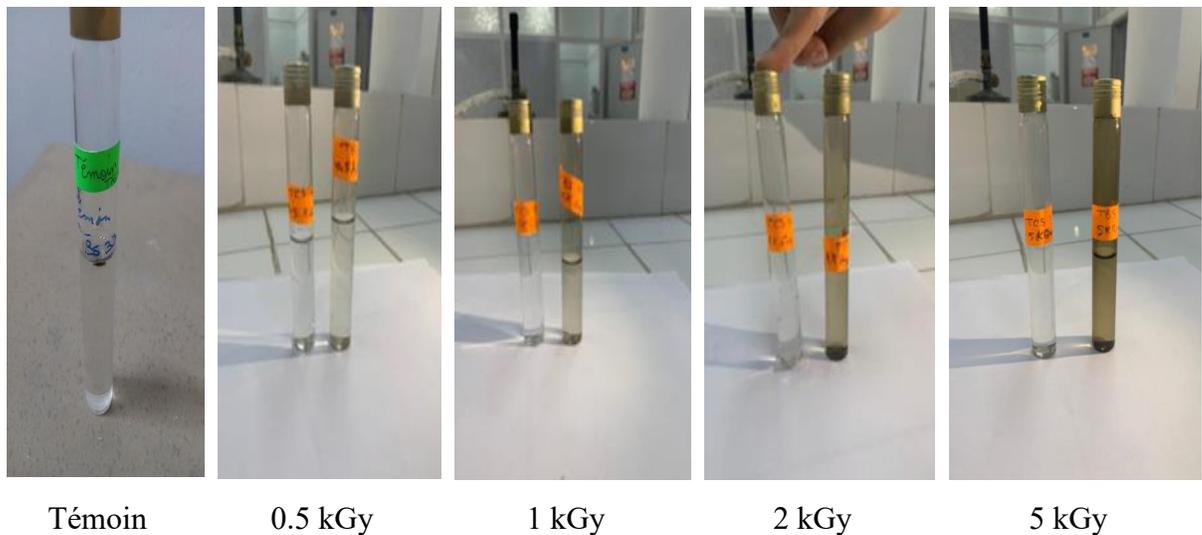


Figure 8 : Observations post-irradiation

Ce comportement différentiel suggère que *Aspergillus Niger TBS 33* pourrait activer des mécanismes de défense spécifiques, notamment la synthèse de mélanine, en réponse au stress oxydatif induit par le rayonnement ionisant [140]. À l'inverse, *Penicillium* sp semble présenter une réponse moins marquée, voire une sensibilité accrue à l'irradiation, sans activation visible de mécanismes protecteurs.

b) Dénombrement des spores à l'aide de la cellule de Malassez

Le dénombrement des spores a été effectué à l'aide d'une cellule de Malassez, un dispositif de comptage microscopique permettant d'estimer la concentration cellulaire dans une suspension. La cellule comprend une grille gravée de dimensions connues, permettant de calculer le volume observé sous l'objectif du microscope.

➤ **Principe du calcul du nombre de spores à l'aide de la cellule de Malassez**

Le dénombrement des spores a été réalisé à l'aide de la cellule de Malassez, selon les étapes suivantes :

1. Une suspension homogène de spores a d'abord été préparée à partir des échantillons fongiques cultivés.
2. Une goutte de cette suspension a ensuite été déposée délicatement au centre de la cellule de Malassez.
3. À l'aide d'un microscope optique, le nombre de spores a été compté dans un nombre défini de grands carrés de la grille (généralement 10).
4. La moyenne du nombre de spores par grand carré a été calculée.
5. Enfin, cette moyenne a été utilisée dans la formule suivante pour estimer la concentration sporale dans la suspension :

$$N = \frac{nFd}{a.V}$$

N : nombre de cellules par unité de volume (spores/ml)

n : nombre total de cellules comptées

a : nombre d'unités de comptage utilisées (grands carrés)

V : volume d'une unité de comptage (pour la cellule de Malassez, un grand carré = $2,5 \times 10^{-4}$ ml)

Fd : facteur de dilution (si la suspension a été diluée)

➤ **Les résultats des calculs**

Les résultats des calculs de concentration sporale pour les deux souches fongiques (*Aspergillus Niger* TBS 33 et *Penicillium* sp) en fonction des différentes doses d'irradiation

sont présentés dans le Tableau 3 Ces résultats permettent d'évaluer l'effet de l'irradiation gamma sur la densité sporale de chaque souche.

Les détails des calculs effectués, notamment les valeurs comptées, les moyennes, les volumes utilisés ainsi que les facteurs de dilution appliqués, sont fournis en **Annexe A** afin d'assurer la transparence et la traçabilité des méthodes utilisées.

Tableau 3 : Calculs de concentration sporale (Cellules/ml)

	0 kGy	0.5 kGy	01 kGy	02 kGy	05 kGy
TCS 34	1.21×10^{10}	1.54×10^9	5.44×10^{10}	5.04×10^9	1.17×10^9
TBS 33	4.55×10^{10}	2.24×10^9	5.44×10^9	2.20×10^9	1.59×10^9

Ces résultats des calculs de concentration sporale sont présentés sur la figure ci-dessous

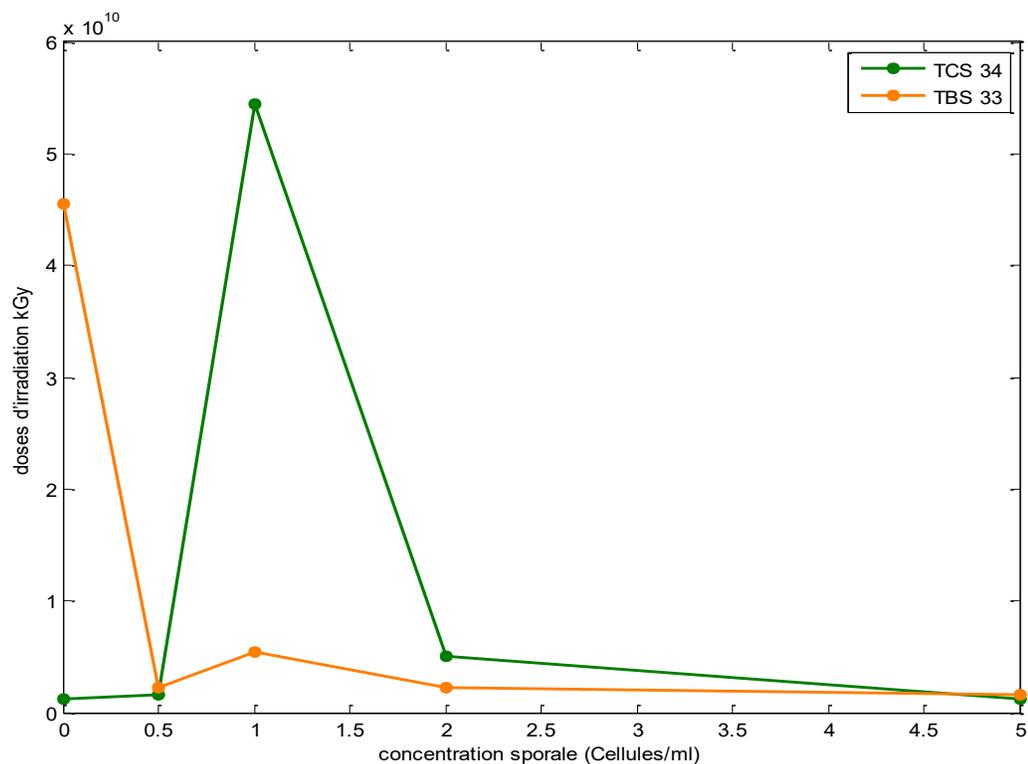


Figure 9 : Résultats de calculs de concentration sporale (Cellules/ml)

➤ **Interprétation des résultats (Tableau 3) :**

Les concentrations sporales mesurées en fonction des doses d'irradiation gamma (0, 0.5, 1, 2 et 5 kGy) révèlent des tendances distinctes pour les deux souches fongiques testées :

1. Souche *Penicillium* sp (TCS 34)

- À 0 kGy, la concentration sporale est élevée ($1,21 \times 10^9$ cellules/mL), ce qui correspond à une croissance normale sans stress.
- Une baisse importante est observée à 0,5 kGy ($1,54 \times 10^9$), indiquant une sensibilité dès les faibles doses.
- De façon surprenante, la concentration augmente fortement à 1 kGy ($5,44 \times 10^{10}$), ce qui pourrait traduire une réponse adaptative ou une erreur expérimentale.
- La concentration diminue de nouveau à 2 kGy ($5,04 \times 10^9$) et 5 kGy ($1,17 \times 10^9$), confirmant une inhibition progressive de la sporulation à fortes doses.

2. Souche *Aspergillus Niger* (TBS 33)

- La concentration maximale est observée à 0 kGy ($4,55 \times 10^{10}$ cellules/mL), indiquant une forte capacité sporale en absence d'irradiation.
- Une chute marquée est constatée dès 0,5 kGy ($2,24 \times 10^9$), traduisant une sensibilité initiale.
- À 1 kGy, la concentration augmente à $5,44 \times 10^9$, suggérant une certaine tolérance ou activation partielle.
- Aux doses supérieures (2 kGy et 5 kGy), les concentrations restent faibles ($\approx 2,20 \times 10^9$ et $1,59 \times 10^9$), traduisant une inhibition partielle mais une résilience plus marquée que *Penicillium*.

3. Comparaison entre les deux souches

- À toutes les doses (sauf à 1 kGy pour TCS 34), *Aspergillus Niger TBS 33* présente une concentration sporale plus élevée que *Penicillium* sp, ce qui suggère une meilleure tolérance globale à l'irradiation gamma.
- La réduction de la concentration sporale avec l'augmentation des doses est une tendance commune, confirmant l'effet inhibiteur des rayons gamma sur la sporulation.

- La valeur anormalement élevée observée pour *Penicillium* à 1 kGy pourrait résulter d'un phénomène de stimulation transitoire, mais mérite une vérification expérimentale.

Les résultats indiquent que l'irradiation gamma a un **effet dose-dépendant** sur la sporulation des deux souches. Toutefois, *Aspergillus Niger TBS 33* montre une **meilleure résistance** aux doses élevées, ce qui en fait une **candidature plus robuste pour des applications en conditions irradiées**, comme la bioremédiation ou la biotechnologie en environnements extrêmes.

Remarque importante

Le dénombrement effectué à l'aide de la cellule de Malassez fournit le nombre total de spores présentes dans la suspension, sans distinction entre spores vivantes et mortes. Il s'agit donc d'une quantification globale.

Pour évaluer la viabilité réelle des spores après irradiation, une croissance sur milieu nutritif (PDA) a été réalisée. Cette étape permet de vérifier la capacité des spores à germer et à former un mycélium actif, ce qui constitue un indicateur direct de leur état physiologique post-irradiation.

c) Résultats de la croissance des spores après irradiation

Les résultats de la croissance des spores après irradiation gamma sont présentés dans les tableaux 4, 5, 6 et 7 correspondants respectivement à l'irradiation sur la face avant (recto) et à l'irradiation sur la face arrière (verso) des boîtes de Pétri contenant les spores pour les deux souches.

Les observations ont été faites à différents intervalles de temps (J+7, J+15 et J+30), afin de suivre l'évolution de la croissance et du développement mycélien.

Chaque tableau illustre les effets de différentes doses de rayonnement (0, 0.5, 1, 2, 5 kGy) sur la viabilité des spores des deux souches testées (*Aspergillus Niger TBS 33* et *Penicillium sp*). Les doses d'irradiation utilisées dans cette étude ont été choisies en se basant sur les données de la littérature, conformément à la référence [141-149], afin de permettre une comparaison pertinente des effets du rayonnement sur la viabilité sporale des deux souches.

Tableau 4 : résultats de la croissance des spores TCS34 après irradiation (face avant)

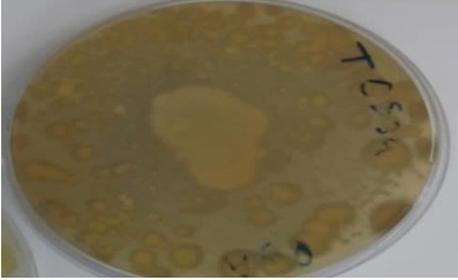
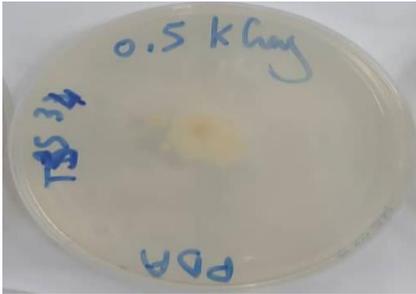
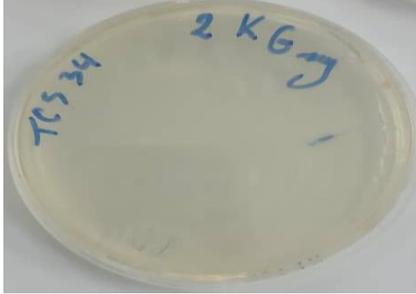
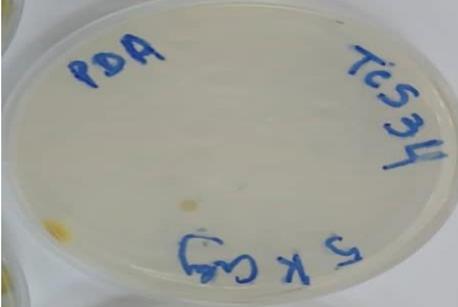
	1 semaine	2 semaines
0 kGy		
0.5 kGy		
1 kGy		
2 kGy		
5 kGy		

Tableau 5 : Résultats de la croissance des spores après TCS 34 irradiation (face arrière)

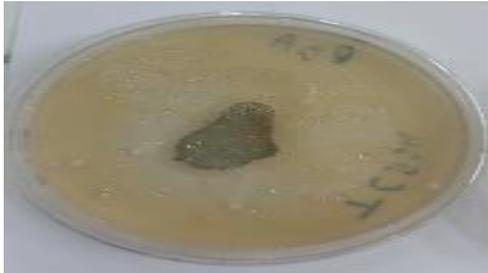
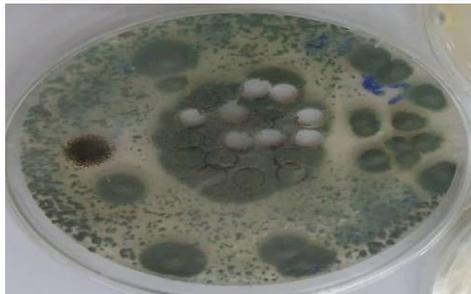
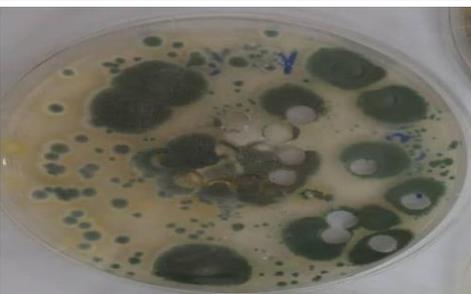
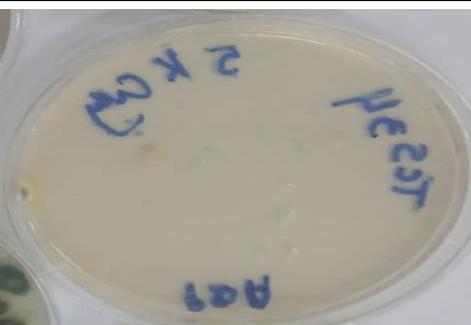
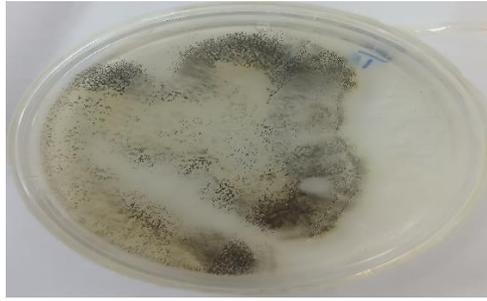
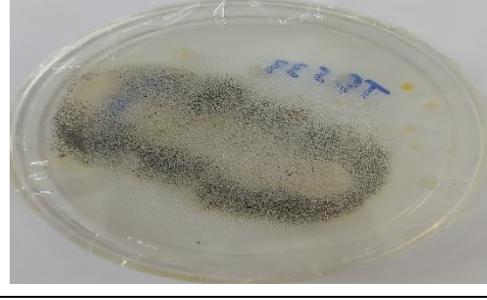
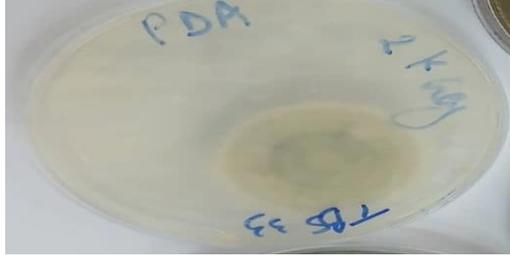
	1 semaine	2 semaines
0 kGy		
0.5 kGy		
1 kGy		
2 kGy		
5 kGy		

Tableau 6 : Résultats de la croissance des spores TBS34 après irradiation (face avant)

	1 semaine	2 semaines
0 kGy		
0.5 kGy		
1 kGy		
2 kGy		
5 kGy		

Tableau 7 : résultats de la croissance des spores TBS 33 après irradiation (face arrière)

	1 semaine	2 semaines
0 kGy		
0.5 kGy		
1 kGy		
2 kGy		
5 kGy		

On observe nettement un effet dose-dépendant de l'irradiation gamma sur la viabilité des spores

- La souche *Aspergillus Niger TBS 33* montre une tolérance relativement élevée aux faibles doses, avec une croissance mycélienne bien visible jusqu'à **2,0 kGy**, notamment après une semaine d'incubation, en condition d'irradiation recto. Fait remarquable, un développement tardif, bien que faible, a également été détecté à la dose de **5,0 kGy** après deux semaines, suggérant une capacité partielle de récupération.
- À l'inverse, la souche *Penicillium sp* se révèle plus sensible au rayonnement. Une absence totale de développement est observée dès **1,0 kGy** au cours de la première semaine. Toutefois, à **2,0 kGy**, un développement retardé a été noté à la deuxième semaine, tandis qu'aucune repousse n'a été enregistrée à **5,0 kGy**, même après 30 jours. Aucune croissance n'a été observée pour les spores irradiées à 5,0 kGy confirmant une perte complète de viabilité à cette dose.

Ces résultats mettent en évidence une différence de résilience entre les deux souches, avec *TBS 33* présentant une meilleure adaptation au stress induit par les rayonnements ionisants.

II. Effet de l'irradiation neutronique sur les champignons

L'irradiation neutronique, bien que moins courante que l'irradiation gamma, est utilisée dans des contextes spécifiques pour étudier les effets des rayonnements sur les micro-organismes.

D'après les résultats obtenus lors des expériences précédentes, *TBS 33* s'est révélée être particulièrement résistante à l'irradiation ionisante. En effet, cette souche a démontré une capacité remarquable à survivre et à germer même après une exposition à des doses élevées de rayonnement gamma, atteignant jusqu'à 5 kGy. Cette tolérance inhabituelle suggère que cette espèce possède des mécanismes de protection cellulaires efficaces contre les dommages induits par les rayonnements ionisants, tels que la réparation de l'ADN, ou encore la robustesse de ses spores.

Dans ce contexte, et afin de mieux comprendre l'étendue de la radiorésistance de cette souche, nous avons décidé d'élargir notre étude à un autre type de rayonnement : l'irradiation neutronique. Contrairement aux rayonnements gamma, les neutrons interagissent principalement avec les noyaux atomiques et provoquent des effets biologiques différents, notamment par la génération de particules secondaires et une forte ionisation indirecte. Il est

donc pertinent d'évaluer si la résistance observée chez *TBS 33* face aux rayons gamma s'étend également à l'exposition aux neutrons [150].

1. Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de l'irradiation neutronique sur la souche fongique *TBS 33*, en analysant ses effets à plusieurs niveaux biologiques. L'étude porte notamment sur la viabilité des spores après exposition à différentes doses de rayonnement neutronique, la croissance mycélienne, ainsi que la capacité de sporulation suite à l'irradiation. Elle s'intéresse également aux altérations morphologiques observables au microscope, telles que les modifications de la structure des hyphes et des spores, ainsi qu'à la résistance de la souche face à divers stress environnementaux post-exposition. À travers ces analyses, cette recherche vise à mieux comprendre les mécanismes de résistance ou de sensibilité *TBS 33* aux rayonnements neutroniques, dans une perspective appliquée à la biosécurité, à la désinfection des matériaux ou milieux contaminés, ou encore à la mutagenèse dirigée pour la sélection de souches d'intérêt.

2. Matériel et méthodes

L'étude a été menée sur la souche fongique *Aspergillus Niger* identifiée sous le code *TBS 33*. Cette souche a été cultivée sur un milieu PDA (Potato Dextrose Agar), couramment utilisé pour la croissance des champignons filamenteux en raison de sa richesse en nutriments.



Source d'irradiation neutronique



Les entré de la source d'irradiation

Figure 10 : Source d'irradiation neutronique

Le matériel utilisé comprend des boîtes de Petri stériles pour les ensemencements, des tubes à essai pour la préparation des suspensions de spores, des pipettes pour les manipulations aseptiques, ainsi qu'un microscope optique pour l'observation des structures morphologiques. L'irradiation neutronique a été réalisée à l'aide d'une source d'irradiation dédiée permettant un contrôle précis du flux de neutrons. Les cultures ont été incubées à une température constante comprise entre 28 et 30 °C, conditions optimales pour le développement de *Aspergillus Niger TBS 33*.

3. Préparation des spores

La préparation des spores *TBS 33* a débuté par la culture du champignon sur un milieu solide PDA (Potato Dextrose Agar), incubé pendant une durée de 5 à 7 jours à une température de 28 °C, afin de permettre une sporulation optimale.

Une fois la sporulation bien développée, les spores ont été récoltées. La suspension obtenue a ensuite été homogénéisée et filtrée si nécessaire, puis la concentration des spores a été calculer à l'aide de la cellule Malassez permettant d'ajuster précisément la densité de la suspension pour les expérimentations ultérieures.



Figure 11 : Préparation des spores

4. Irradiation neutronique

La suspension de spores *TBS 33*, préalablement préparée, a été divisée en plusieurs aliquotes en vue des traitements par irradiation. L'irradiation neutronique a été effectuée à l'aide d'une chambre spécialement conçue, équipée d'un système de flux neutronique contrôlé. Cette chambre comporte différentes zones d'exposition : certaines zones génèrent un flux neutronique intense (1000 n/s), tandis que d'autres fournissent un flux modéré. Les aliquotes ont été exposées dans ces zones pendant une durée fixe de trois jours, afin d'étudier l'effet du niveau d'intensité du flux neutronique sur les spores pour une même période d'exposition.

Par la suite, l'expérimentation a été poursuivie en maintenant les spores dans la zone à flux intense, tout en faisant varier la durée d'exposition (3 jours, 6 jours, 10 jours) [151-155], afin d'analyser l'impact du temps d'irradiation sur les paramètres biologiques étudiés et évaluer la dose-dépendante des effets sur la viabilité et le comportement morfo-physio-logique des spores.

5. Résultats et discussions

a) Ensemencement post-irradiation

Après irradiation, un volume de 10 ml de chaque échantillon de spores traité à différentes doses de rayonnement neutronique a été prélevé et ensemencé de manière aseptique sur des boîtes de Petri contenant du milieu solide PDA (Potato Dextrose Agar). Chaque condition d'irradiation a été testée en double ou en triple pour assurer la reproductibilité des résultats. Les boîtes ont ensuite été incubées à une température constante de 28 °C pendant une période de 3 à 7 jours, afin de permettre l'observation de la croissance mycélienne, le développement des spores et la sporulation. Cette étape post-irradiation est cruciale pour évaluer l'impact des différentes doses et conditions de flux neutronique sur la capacité de développement fongique de TBS 33.

Après 7 jours d'incubation à 28 °C sur milieu PDA, une différence marquée a été observée entre le témoin non irradié et les échantillons soumis à une irradiation neutronique sous flux intense, appliquée pendant **3, 6 et 10 jours**. Le témoin a présenté une croissance mycélienne dense, homogène, accompagnée d'une sporulation abondante, traduisant un développement fongique normal. En revanche, les échantillons irradiés ont montré une croissance réduite, caractérisée par un diamètre de colonie inférieur à celui du témoin, une sporulation diminuée, ainsi que des modifications morphologiques visibles, telles qu'un mycélium clairsemé ou la présence de zones décolorées. Ces observations indiquent que l'exposition prolongée à un flux neutronique intense exerce un stress important sur TBS 33, compromettant sa croissance et sa capacité de sporulation. Ces résultats sont illustrés dans le tableau ci-dessous

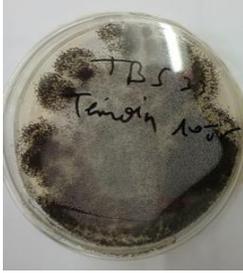
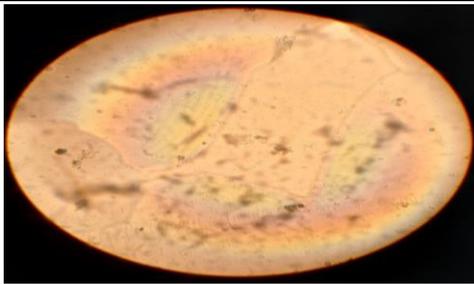
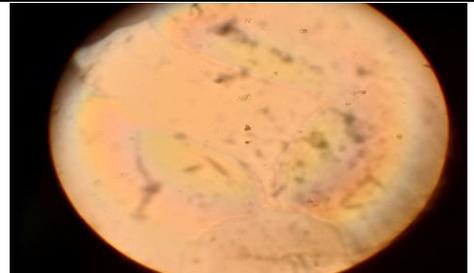
Nombre de jours	Face avant (recto)		Face arrière (verso)	
	Témoin	Irradié	Témoin	Irradié
3				
6				
10				

Tableau 8: Résultats de la croissance des spores TBS 33 après irradiation neutronique

b) Évaluation morphologique

L'observation morphologique des cultures *TBS 33* a été réalisée au microscope optique afin de détecter d'éventuelles altérations structurales induites par l'irradiation neutronique. Des prélèvements ont été effectués à partir des colonies développées sur milieu PDA après incubation. Les préparations microscopiques ont permis d'examiner plusieurs critères morphologiques, notamment la forme et la ramification des hyphes, ainsi que l'aspect des spores (taille, forme, régularité).

Tableau 9 : Observation morphologique des cultures d TBS 33

	Témoïn	Flux intense sous microscope
3 jours		
6 jours		
10 jours		

Ces observations ont été comparées entre les échantillons témoins (non irradiés) et ceux soumis aux rayonnements neutroniques pour des différentes périodes (3, 6 et 10 jours). Toute anomalie, telle qu'une déformation des spores, une fragmentation des hyphes ou une réduction du diamètre hyphal, a été notée comme indicateur potentiel d'un stress morphogénique lié à l'exposition neutronique. **Malheureusement, la mauvaise qualité des images obtenues n'a pas permis d'identifier précisément d'éventuelles anomalies morphologiques.** Cette limitation est principalement due aux performances insuffisantes du microscope utilisé.

c) Évaluation quantitative

La sporulation *TBS 33* a été évaluée à la fois de manière qualitative, par observation visuelle directe des colonies, et de manière quantitative, par comptage des spores au microscope optique à l'aide d'une cellule de Malassez. Cette double approche a permis d'apprécier l'impact de l'irradiation neutronique sur la capacité sporulant du champignon. Les échantillons irradiés sous

un flux neutronique intense ont été analysés après des périodes d'exposition variables (3, 6 et 10 jours). Les résultats obtenus montrent une variation significative du taux de sporulation en fonction de la durée d'irradiation. Ces données sont illustrées dans le tableau ci-dessous, qui présente les valeurs moyennes de spores observées par mL, comparées au témoin non irradié, permettant ainsi d'évaluer l'effet du stress neutronique sur la reproduction asexuée de la souche.

Tableau 10: Calculs de concentration sporale (Cellules/ml)

Durée d'exposition	Témoin (non irradié)	Échantillon irradié
3 jours	$2,33 \times 10^8$	$2,15 \times 10^9$
6 jours	$4,67 \times 10^8$	$9,4 \times 10^8$
10 jours	$2,4 \times 10^8$	$5,51 \times 10^8$

Ces résultats des calculs de concentration sporale sont présentés sur la figure ci-dessous

d) Interprétation du Tableau 10 : Effet de l'irradiation neutronique sur la sporulation

L'étude repose sur une évaluation double (qualitative et quantitative) de la sporulation d'*Aspergillus niger* TBS 33 après exposition à un flux neutronique intense pendant différentes durées (3, 6 et 10 jours), comparée à des témoins non irradiés.

Analyse des tendances

1. **À 3 jours**, la sporulation du champignon irradié est presque **10 fois supérieure** à celle du témoin non irradié. Cela suggère un **effet de stimulation** de la reproduction asexuée à court terme, potentiellement lié à une réponse adaptative au stress.
2. **À 6 jours**, bien que l'effet reste positif, la différence est moins marquée (le double environ), indiquant un **affaiblissement de l'effet inducteur** du rayonnement neutronique sur la sporulation avec le temps.
3. **À 10 jours**, la concentration sporale de l'échantillon irradié est toujours supérieure à celle du témoin, mais l'écart est plus réduit. Cela pourrait traduire un **début d'inhibition progressive** ou un **épuisement des ressources cellulaires** dues à l'exposition prolongée.

Ces résultats montrent que l'irradiation neutronique exerce un **effet non linéaire** sur la sporulation d'*Aspergillus Niger* TBS 33. Une **stimulation initiale** est observée à court terme (3

jours), suivie d'un **ralentissement progressif** de cette réponse au fur et à mesure que la durée d'exposition augmente. Cela suggère que la souche TBS 33 possède une certaine **résilience au stress neutronique**, avec un potentiel d'adaptation à des environnements irradiés, ce qui pourrait être exploité dans des contextes de bioremédiation en milieux extrêmes.

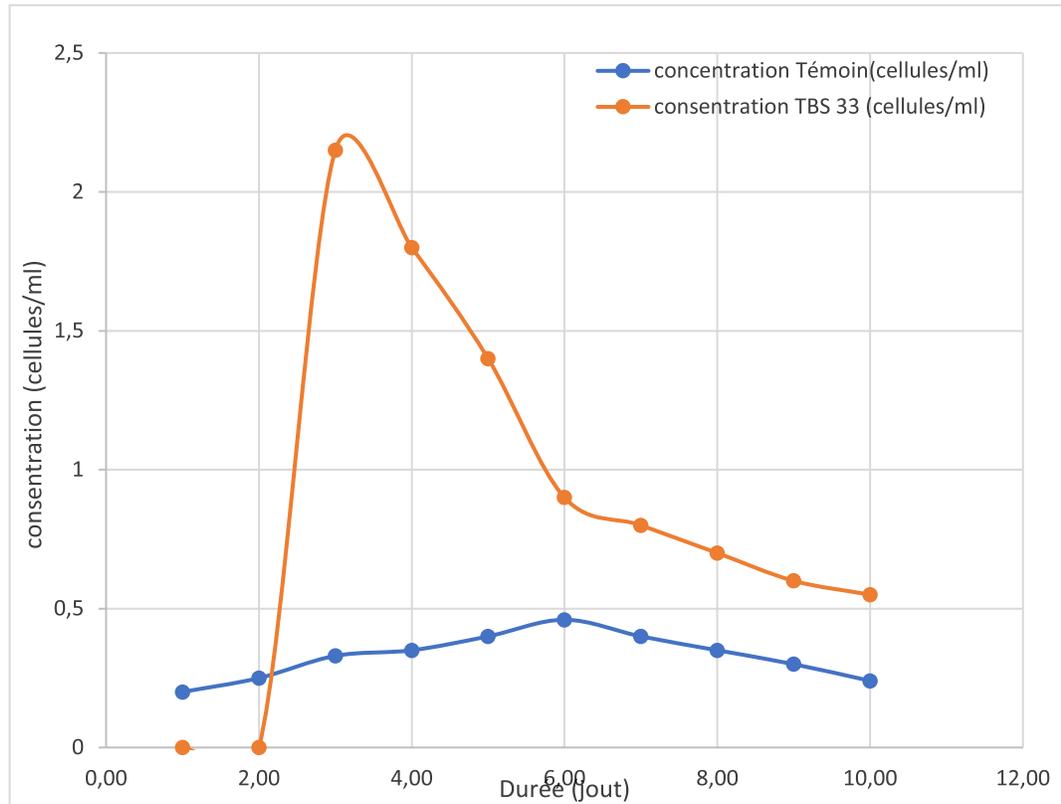


Figure 12: Effet neutronique sur la concentration cellulaire

Conclusion de chapitre

Les résultats obtenus mettent en évidence les effets différenciés de l'irradiation gamma et neutronique sur la sporulation et la viabilité de deux souches fongiques, *Penicillium sp.* (TCS 34) et *Aspergillus Niger* (TBS 33), en soulignant leur réponse respective au stress induit par les rayonnements.

1. Irradiation gamma

- La souche TBS 33 s'est révélée globalement plus tolérante à l'irradiation gamma que *Penicillium sp.*, avec une sporulation encore détectable à 5 kGy, bien que faible.

- En revanche, *Penicillium sp.* a présenté une sensibilité accrue, avec une inhibition totale de la sporulation dès 1 kGy et une absence complète de croissance à 5 kGy.
- La sporulation suit une tendance dose-dépendante décroissante pour les deux souches, avec un possible effet stimulant transitoire observé à 1 kGy pour *Penicillium sp.*, qui nécessite une confirmation expérimentale.
- Ces résultats confirment l'effet inhibiteur croissant du rayonnement gamma sur la reproduction fongique, tout en mettant en évidence une certaine résilience adaptative de la souche TBS 33.

2. Irradiation neutronique

- L'exposition à un flux neutronique intense pendant 3, 6 et 10 jours a permis d'évaluer les réponses morphologiques et fonctionnelles de TBS 33.
- Une stimulation initiale de la sporulation a été observée après 3 jours d'exposition (≈ 10 fois supérieure au témoin), suivie d'une diminution progressive de cet effet avec le temps (effet réduit à 2x à 6 jours, puis légèrement supérieur au témoin à 10 jours).
- Cette évolution suggère une réponse adaptative temporaire suivie d'un début d'inhibition, probablement liée à l'épuisement cellulaire ou aux dommages cumulés.
- Morphologiquement, les échantillons irradiés présentent une croissance mycélienne amoindrie, des anomalies visibles (décoloration, mycélium clairsemé), et une sporulation réduite, bien que l'analyse fine ait été limitée par la qualité des images microscopiques.

3. Comparaison et implications

- Dans toutes les conditions testées, TBS 33 a démontré une meilleure capacité de survie, de récupération et de sporulation que *Penicillium sp.*, ce qui en fait une souche potentiellement plus adaptée aux environnements soumis à des stress radiatifs.
- Cette résilience relative ouvre des perspectives d'application dans des contextes extrêmes (ex. : bioremédiation en milieu irradié), tout en soulignant la nécessité d'études complémentaires, notamment pour vérifier certaines valeurs aberrantes et explorer les mécanismes moléculaires de tolérance.

Chapitre 3 :

Dégradation des métaux lourds

Chapitre 3 : Dégradation des métaux lourds

Introduction

La contamination des sols et des eaux par les métaux lourds constitue une problématique environnementale majeure, en raison de leur toxicité, de leur persistance dans l'environnement et de leur tendance à s'accumuler dans la chaîne alimentaire. Face aux limites des techniques physico-chimiques classiques de dépollution, coûteuses et souvent inefficaces à long terme, les approches biologiques, notamment la mycoremédiation, suscitent un intérêt croissant.

Parmi les champignons filamenteux utilisés en bioremédiation, *TBS 33* se distingue par sa capacité remarquable à survivre dans des environnements pollués et à interagir avec divers contaminants, notamment les métaux lourds. La souche TBS 33 a montré un fort potentiel dans la biosorption, la bioaccumulation, voire la transformation de métaux toxiques tels que le cuivre (Cu), le plomb (Pb), ou encore le cadmium (Cd), grâce à des mécanismes biologiques complexes impliquant les parois cellulaires, la sécrétion d'acides organiques, et des enzymes spécifiques.

Ce chapitre vise à évaluer la tolérance des souches fongiques aux métaux lourds, ainsi qu'à leur capacité à dégrader ou immobiliser ces contaminants.

1. Tolérance des souches fongiques aux métaux lourds

a) Biosorption

La biosorption est un mécanisme physico-chimique par lequel des micro-organismes (vivants ou morts), comme les champignons captent et fixent les métaux lourds présents dans leur environnement, notamment dans l'eau ou les sols contaminés [156].

b) Bioaccumulation

La bioaccumulation est un processus actif par lequel des micro-organismes vivants, tels que des champignons, des bactéries ou des algues, absorbent, transportent et stockent des substances toxiques (comme les métaux lourds ou les radionucléides) à l'intérieur de leurs cellules. Contrairement à la biosorption (phénomène passif, externe à la cellule), la bioaccumulation dépend du métabolisme cellulaire et implique des mécanismes biologiques complexes [157].

c) Biotransformation (ou bioconversion)

La biotransformation désigne l'ensemble des modifications chimiques que des micro-organismes vivants (comme des champignons) peuvent opérer sur des polluants métalliques ou radioactifs, en les convertissant en formes moins toxiques, plus solubles ou moins mobiles [158].

d) Complexation et chélation

La complexation et la chélation sont deux mécanismes biologiques essentiels permettant aux micro-organismes (comme les champignons ou bactéries) de fixer, neutraliser ou mobiliser les métaux lourds ou les radionucléides. Ces processus jouent un rôle clé dans la bioremédiation, car ils réduisent la toxicité et la mobilité des métaux dans l'environnement [159].

e) Volatilisation

La volatilisation est un mécanisme de biotransformation par lequel certains micro-organismes transforment des métaux lourds ou métalloïdes en formes volatiles, souvent moins toxiques ou plus facilement éliminables. C'est un processus moins courant mais particulièrement intéressant pour la bioremédiation de certains éléments toxiques [160].

1. La toxicité des métaux lourds

Les métaux lourds tels que le cuivre (Cu), le plomb (Pb) et le cadmium (Cd) sont des éléments métalliques ayant une densité élevée et pouvant présenter une toxicité importante même à faibles concentrations. Leur présence excessive dans les écosystèmes, notamment en raison des activités industrielles, représente une menace pour la santé humaine, animale, végétale et microbienne [161].

a) Le cuivre (Cu)

Le cuivre est un oligo-élément essentiel pour de nombreux organismes, jouant un rôle dans les processus enzymatiques, la respiration cellulaire et la synthèse des pigments. Cependant, à fortes concentrations [162] :

- Il génère des radicaux libres provoquant un stress oxydatif.
- Il altère la perméabilité des membranes cellulaires.
- Il inhibe certaines fonctions enzymatiques et perturbe la croissance microbienne.

- Il peut provoquer des lésions hépatiques ou rénales chez les animaux.

b) Plomb (Pb)

Le plomb est un métal non essentiel et hautement toxique [163] :

- Il interfère avec la synthèse de l'hémoglobine et la production des globules rouges.
- Il affecte le système nerveux central, en particulier chez les enfants.
- Il perturbe les fonctions rénales, digestives et reproductives.
- Chez les micro-organismes, il inhibe la croissance, la division cellulaire et l'activité enzymatique.

C) Cadmium (Cd)

Le cadmium est un métal extrêmement toxique, même à très faibles concentrations. Il n'a aucune fonction biologique [164] :

- Il s'accumule dans les reins et provoque des dysfonctionnements rénaux chroniques.
- Il perturbe le métabolisme du calcium, menant à des problèmes osseux (ostéomalacie).
- Il est classé comme cancérigène par l'OMS.
- Il provoque des dégâts cellulaires importants chez les micro-organismes et réduit leur activité métabolique.

2. La présence combinée des radionucléides et des métaux lourds

Dans de nombreux sites pollués qu'ils soient d'origine industrielle, minière, militaire ou issus de la gestion des déchets radioactifs on observe la co-présence de radionucléides (éléments radioactifs) et de métaux lourds. Cette combinaison génère des conditions de contamination complexes et particulièrement dangereuses, tant pour les écosystèmes que pour la santé humaine [165].

a) Origine de la Co-contamination

La co-présence de radionucléides et de métaux lourds peut résulter de :

- Rejets industriels (industries minières, métallurgiques, chimiques, nucléaires)
- Incidents ou accidents nucléaires (Tchernobyl, Fukushima)

- Sites de stockage ou de traitement de déchets radioactifs
- Utilisation de phosphates ou d'engrais contaminés, riches en uranium, thorium, plomb, etc. [166].

b) Impacts environnementaux

Cette double contamination présente plusieurs risques majeurs :

- Effet synergique ou additif : La présence simultanée de radionucléides et de métaux lourds peut amplifier leur toxicité respective.
- Stress oxydatif renforcé : Les radionucléides émettent des rayonnements ionisants (alpha, bêta, gamma), qui, combinés à la toxicité chimique des métaux lourds, génèrent des niveaux élevés de stress oxydatif chez les organismes vivants.
- Bioaccumulation : Les deux types de contaminants peuvent s'accumuler dans les tissus vivants, franchissant les chaînes trophiques.
- Altération de la biodiversité microbienne : Les populations microbiennes, pourtant essentielles à l'équilibre écologique (recyclage de la matière organique, dégradation des polluants), sont souvent gravement perturbées [167].

c) Enjeux pour la dépollution

La Co-contamination radionucléide/métal lourd constitue un défi majeur pour la bioremédiation

- Les micro-organismes doivent être résistants à la fois à la toxicité chimique (métaux) et aux rayonnements ionisants.
- Certaines souches fongiques ou bactériennes ont montré des capacités d'adaptation et de détoxification, notamment via la biosorption, la bioaccumulation, la biotransformation ou encore la complexation des contaminants.
- Le développement de stratégies biotechnologiques combinées (biosystèmes multi-agents, ingénierie microbienne, mycoremédiation) est une voie prometteuse pour traiter ces milieux complexes [168].

3. Tolérance des champignons aux métaux lourds

Les champignons présentent une tolérance remarquable aux métaux lourds, ce qui en fait des candidats prometteurs pour les stratégies de bioremédiation. Cette capacité repose sur plusieurs mécanismes biologiques, biochimiques et structuraux qui leur permettent non seulement de survivre dans des environnements contaminés, mais aussi de transformer, immobiliser ou éliminer les métaux toxiques.

Bien que les champignons présentent des capacités remarquables à tolérer et à interagir avec les métaux lourds, cette tolérance n'est pas illimitée. Plusieurs facteurs peuvent réduire leur efficacité ou même compromettre leur survie tel que des concentrations excessives en métaux [169,170].

Au-delà d'un certain seuil (variable selon l'espèce fongique et le métal impliqué), les ions métalliques exercent un effet toxique irréversible. Par exemples : Le cadmium devient létal pour de nombreuses souches dès 10–20 mg/L (10-20 ppm). Le plomb et le cuivre montrent une toxicité aiguë à partir de 50–100 mg/L (50-100 ppm), selon le milieu [171].

4. Protocole d'évaluation de la tolérance fongique aux métaux lourds

Dans le but d'évaluer la tolérance de la souche *Aspergillus Niger* à différentes concentrations de métaux lourds, un protocole expérimental a été mis en place en utilisant trois sels métalliques courants : le sulfate de cuivre (CuSO_4), le nitrate de plomb ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) et le chlorure de cadmium (CdCl_2). Le test repose sur l'observation de la croissance mycélienne sur gélose PDA enrichie. Des solutions mères stériles ont été préparées pour chaque sel métallique, puis incorporées aseptiquement au milieu stérilisé et refroidi à 45 °C, afin d'obtenir trois concentrations finales :

200 ppm, 1000 ppm et 4000 ppm. Un témoin sans métal est également préparé. Les milieux sont répartis à raison de 20 mL par boîte de Petri stérile.

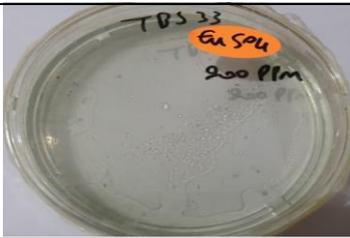
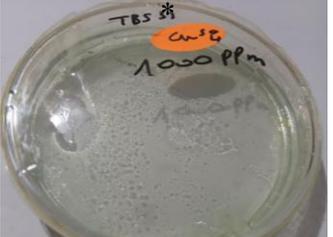
Les résultats de la croissance d'*Aspergillus Niger* en présence des différents métaux lourds (CuSO_4 , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, CdCl_2), à diverses concentrations (200 ppm, 1000 ppm, 4000 ppm), sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Ces données permettent d'évaluer l'effet de chaque métal

sur la croissance mycélienne et de déterminer la concentration minimale inhibitrice (CMI) pour chaque condition.

5. Résultats et discussion

Le tableau 11 présente les résultats de la croissance de la souche TBS 33 dans un milieu contenant du CuSO_4 à différentes concentrations. On observe une absence totale de développement après 5, 6 et 7 jours d'incubation, malgré une durée généralement suffisante pour permettre le développement dans des conditions normales. Ces résultats indiquent clairement que la souche TBS 33 ne tolère pas la présence de CuSO_4 , quelle que soit sa concentration.

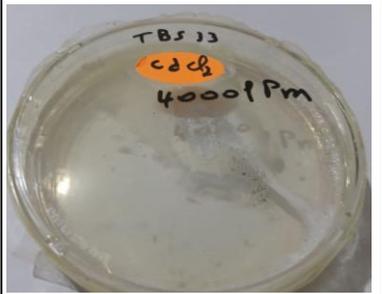
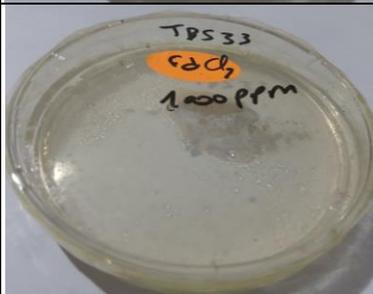
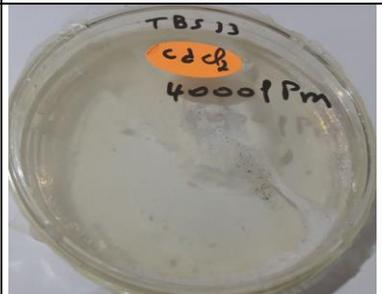
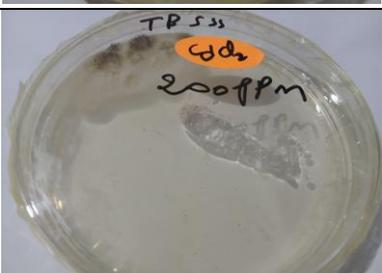
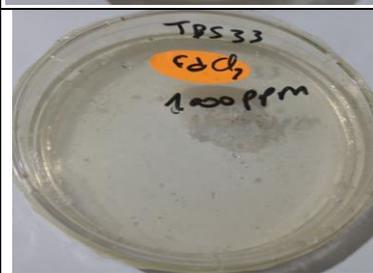
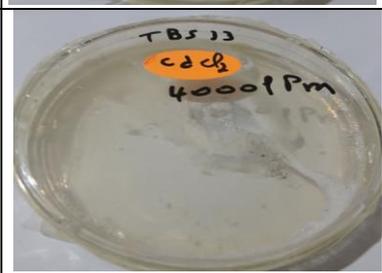
Tableau 11 : résultats de la croissance du TBS 33 dans un milieu contenant du CuSO_4

	200 ppm	1000 ppm	4000 ppm
5 jours			
6 jours			
7 jours			
10 jours			

Croissance visible dans chaque condition Cu.

	200 ppm	1000 ppm	4000 ppm
5 jours	-	-	-
6 jours	-	-	-
7 jours	-	-	-
10 jours	+	-	-

Tableau 12 : résultats de la croissance du TBS 33 dans un milieu contenant du CdCl₂

	200 ppm	1000 ppm	4000 ppm
5 jours			
6 jours			
7 jours			
10 jours			

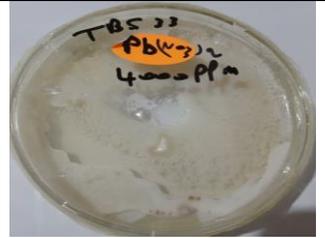
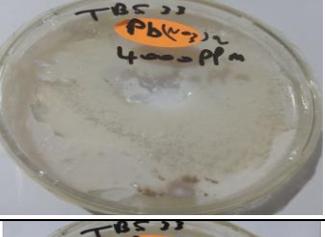
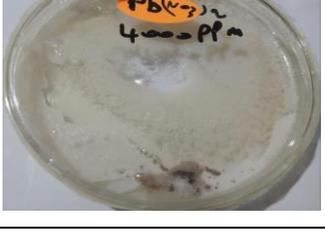
Dans un milieu contenant du CdCl_2 à différentes concentrations, le développement de la souche TBS 33 est observée uniquement à faible concentration (200 ppm), à partir du 5^e jour d'incubation. En revanche, aucun développement n'est constaté aux concentrations plus élevées (1000 et 4000 ppm), même après 7 jours. Ces résultats suggèrent que la souche TBS 33 présente une tolérance limitée au CdCl_2 , uniquement à de faibles concentrations.

Croissance visible dans chaque condition Cd

	200 ppm	1000 ppm	4000 ppm
5 jours	+	-	-
6 jours	+	-	-
7 jours	+	-	-
10 jours	+	-	-

Dans un milieu contenant du $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, le développement de la souche TBS 33 débute dès le 5^e jour d'incubation et est observée pour les concentrations de 200 ppm et 1000 ppm. À la concentration la plus élevée (4000 ppm), seules des traces de développement apparaissent, sans évolution significative au fil du temps. Ces observations suggèrent que le $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ est le métal le mieux toléré par la souche TBS 33, bien que cette tolérance reste limitée à des concentrations n'excédant pas 1000 ppm.

Tableau 13: résultats de la croissance du TBS 33 dans un milieu contenant du $Pb(N_3O)_2$

	200 ppm	1000 ppm	4000 ppm
5 jours			
6 jours			
7 jours			
10 jours			

Croissance visible dans chaque condition Pb

	200 ppm	1000 ppm	4000 ppm
5 jours	+++	+	+
6 jours	+++	+	+
7 jours	+++	++	+
10 jours	+++	++	+

II. Evaluation de la biodégradation des métaux lourds par la souche fongique

Dans un second temps, le même protocole d'évaluation de la tolérance fongique aux métaux lourds a été répété pour les trois métaux lourds (CuSO_4 , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ et CdCl_2) aux mêmes concentrations de 200 ppm, 1000 ppm et 4000 ppm, dans le but de mesurer la concentration résiduelle après incubation. Cette démarche vise à déterminer si la souche *Aspergillus Niger* TBS 33 est capable de réduire la concentration des métaux présents dans le milieu, indiquant ainsi un potentiel de dégradation, biosorption ou bioaccumulation des métaux lourds via spectrométrie d'absorption atomique (SAA) comme illustre la figure 13



Figure 13 : Equipment de la spectrométrie d'absorption atomique (SAA)

1. Principe de la Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA)

La **spectrométrie d'absorption atomique** est une technique analytique utilisée pour déterminer la concentration d'un élément métallique (généralement un métal lourd) dans un échantillon.

Elle repose sur la capacité des atomes à absorber une lumière spécifique correspondant à leur propre spectre d'absorption. Dont le principe de base est :

a. Atomisation de l'échantillon

L'échantillon liquide est introduit dans une flamme (ou un four en graphite) qui vaporise et atomise les métaux présents, c'est-à-dire qu'il transforme les ions métalliques en atomes neutres à l'état gazeux [172].

b. Émission d'une lumière spécifique

Une lampe à cathode creuse émet une lumière monochromatique caractéristique d'un métal donné (ex. : 324,8 nm pour le Cu, 248,3 nm pour le Fe) [173].

c. Absorption sélective

Les atomes métalliques présents dans la flamme absorbent une partie de cette lumière à une longueur d'onde spécifique, proportionnellement à leur concentration [174].

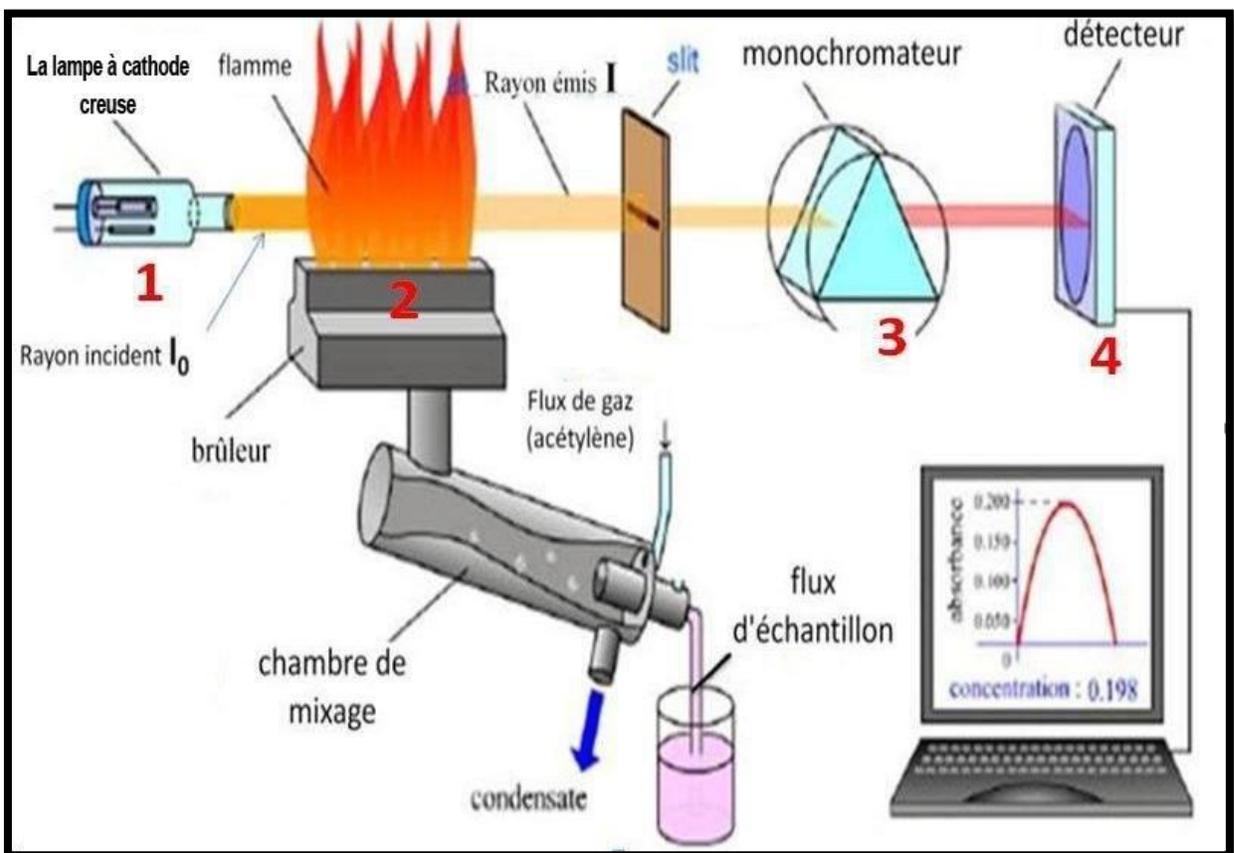


Figure 14 : Principe de la Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA) [175]

d. Détection

L'intensité de la lumière transmise (non absorbée) est mesurée par un détecteur. La différence entre l'intensité émise et celle reçue permet de calculer la concentration de l'élément dans l'échantillon, selon la loi de Beer-Lambert [176].

e. Avantages de la SAA

- Haute sensibilité (jusqu'à des traces de l'ordre du ppm).
- Bonne sélectivité pour les métaux lourds.
- Méthode relativement rapide et fiable [177].

2. Matériel et réactifs

Dans cette étude, le champignon TBS 33, cultivé sous forme sporulée, Les expériences ont été réalisées dans des flacons Erlenmeyer stériles de 250 ml, contenant de l'eau distillée stérile enrichie en sels métalliques : sulfate de cuivre (CuSO_4), nitrate de plomb ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) et chlorure de cadmium (CdCl_2). Les milieux de culture ont été inoculés avec une suspension sporulée TBS 33, puis incubés sur un agitateur orbital afin d'assurer une bonne homogénéisation. Avant utilisation, tous les réactifs et matériaux (verrerie, micropipettes) ont été stérilisés par autoclave pour éviter toute contamination. Après une période d'incubation déterminée, les biomasses fongiques ont été séparées du surnageant à l'aide de papier filtre. Les concentrations résiduelles en métaux dans les solutions ont été analysées par spectrométrie d'absorption atomique (SAA).



Figure 15: Matériel utilisé

3. Préparation des solutions métalliques

a. Préparation des solutions mères stériles :

Préparer des solutions mères stériles de sels métalliques (CuSO_4 , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ et CdCl_2) dans de l'eau distillée stérile, aux concentrations suivantes : 200 ppm, 1000 ppm et 4000 ppm.



Figure 16: Préparation des solutions mères stériles

b. Inoculation fongique :

Inoculer un disque de *Aspergillus Niger* TBS 33 dans chaque tube à essai contenant l'une des solutions préparées. Des tubes témoins (sans champignon) sont également préparés afin de comparer les concentrations initiales et finales des métaux.



Figure 17:Aspergillus Niger TBS 33

c. Incubation :

Incuber les tubes à 28 °C pendant 7 jours, sous agitation douce à 120 ppm, afin de favoriser l'interaction entre la biomasse fongique et les ions métalliques.

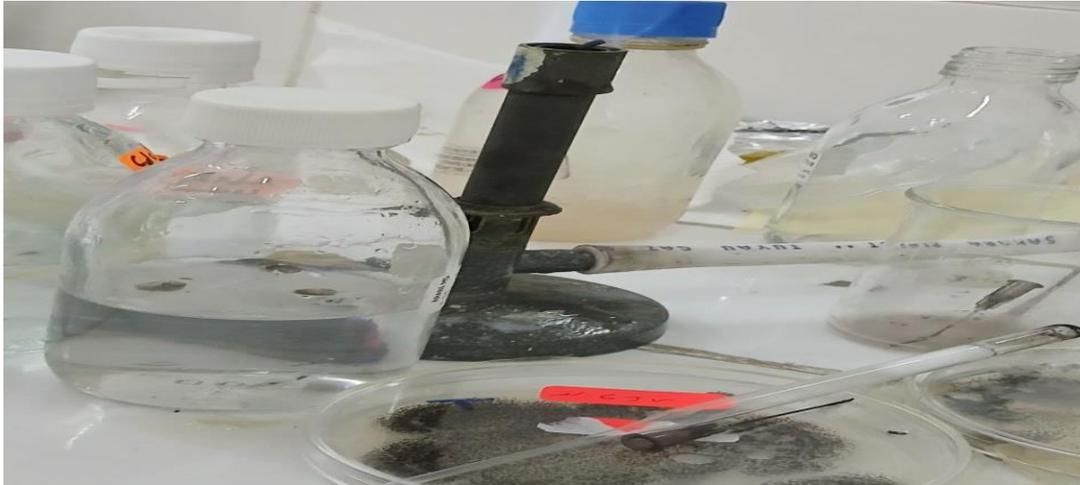


Figure 18 : incubation des disques de TBS 33 dans l'eau distille stérile avec un métal lourd

d. Filtration :

À l'issue de l'incubation, filtrer les contenus des tubes pour séparer la biomasse fongique du liquide résiduel.

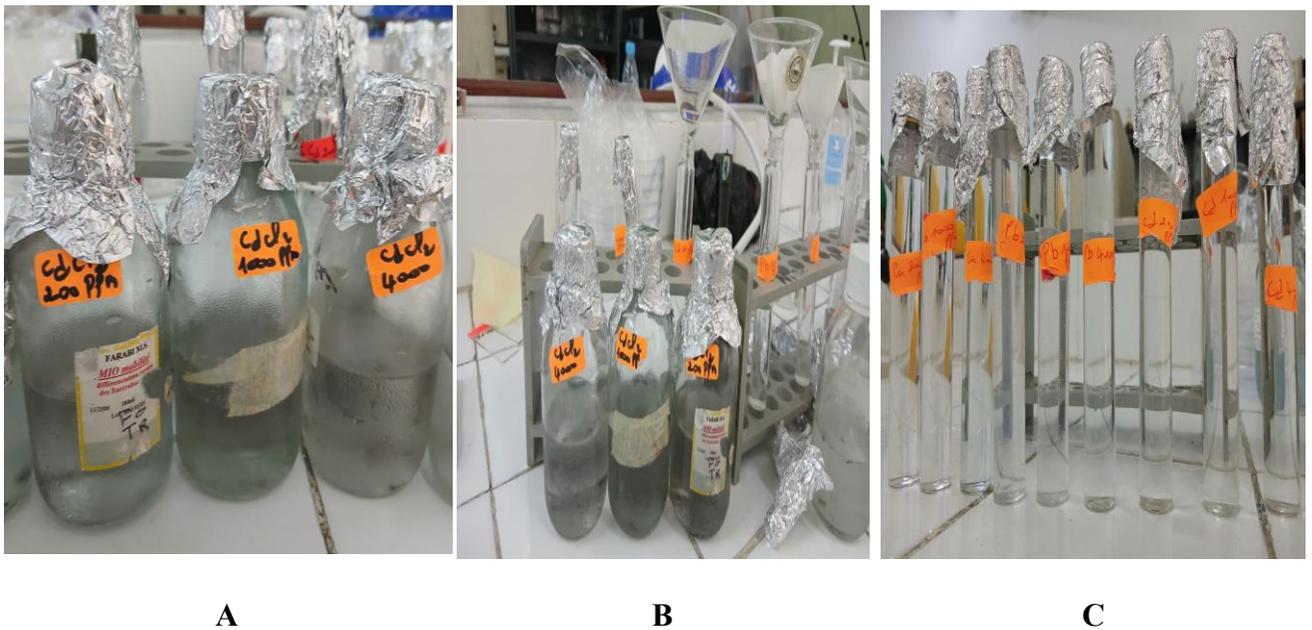


Figure 19: Etapes de Filtration, (A) avant (B) pendant (c) Après filtration

4. Analyse du surnageant

Récupérer le surnageant clair après filtration pour effectuer une analyse par Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA), en vue de déterminer la concentration résiduelle des métaux.



Figure 20 : Remplissez les tubes et placez dans votre position pour l'analyse Analyse par Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA)

Avant l'analyse des échantillons, l'appareil de **Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA)** est étalonné à l'aide de solutions standards de cuivre (Cu), plomb (Pb) et cadmium (Cd) préparées à des concentrations connues. Cette étape permet de construire une courbe d'étalonnage pour chaque métal, indispensable à la quantification précise des concentrations dans les échantillons analysés. Une fois l'étalonnage effectué, les échantillons traités (surnageants clairs après incubation) sont introduits dans l'appareil afin de mesurer la concentration résiduelle de chaque métal.

La **quantité de métal éliminée** par *Aspergillus Niger TBS 33* est ensuite déterminée par la différence entre la concentration initiale (dans le témoin non inoculé) et la concentration finale (après traitement fongique). Cette variation permet d'estimer le taux de biosorption ou bioaccumulation des métaux par la biomasse fongique, exprimé généralement en mg de métal absorbé par gramme de biomasse sèche ou en pourcentage de réduction.

$$\text{pourcentage de réduction \%} = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100$$

C_0 : concentration initiale (ppm)

C_f : concentration finale (ppm après culture)

Tableau 14 : Concentration après l'analyse SAA et leur pourcentage de réduction

	Type de métal	Concentration (ppm)	pourcentage de réduction %
CdCl ₂	200 ppm	10.8512	94.5744
	1000 ppm	12.2221	98.77779
	4000 ppm	13.0110	99.674725
Pb(N ₃ O)	200 ppm	26.0875	86.95625
	1000 ppm	194.9447	80.50553
	4000 ppm	364.0730	90.898175
CuSo ₄	200 ppm	14.7151	92.64245
	1000 ppm	20.8457	97.91543
	4000 ppm	21.3663	99.4658425

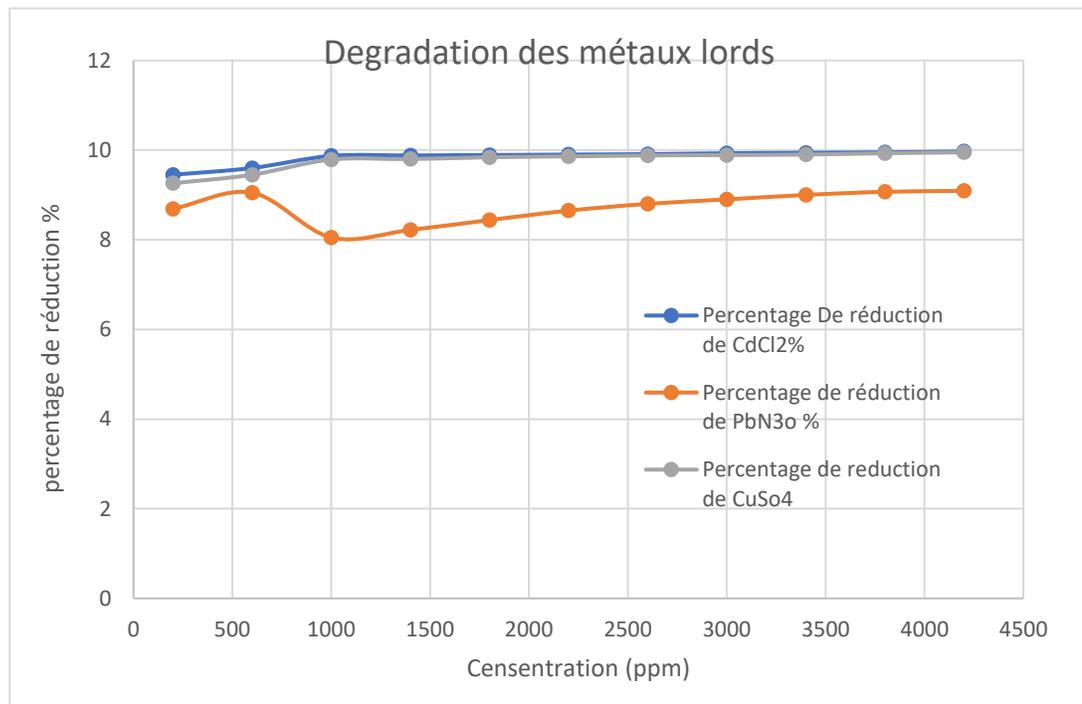


Figure 21: graphe représente le pourcentage de la réduction des métaux lourds

Selon les résultats obtenus, le pourcentage de réduction des métaux lourds dépasse 90 % pour les trois types de métaux, quelle que soit la concentration initiale. Toutefois, ces valeurs ne concordent pas avec les observations issues de l'évaluation de la tolérance fongique, où des effets inhibiteurs marqués étaient constatés à fortes concentrations.

Cette divergence pourrait s'expliquer par la méthode de filtration utilisée avant l'analyse par spectrométrie d'absorption atomique (SAA). En effet, la filtration ne se contente pas de séparer la biomasse fongique, elle pourrait également entraîner une rétention partielle des métaux, réduisant ainsi leur concentration apparente dans les solutions analysées.

Conclusion de chapitre

La souche *Aspergillus Niger* TBS 33 présente une sensibilité marquée au CuSO_4 , avec une absence totale de développement quelle que soit la concentration testée. Une tolérance partielle est observée vis-à-vis du CdCl_2 , limitée à la concentration la plus faible (200 ppm). En revanche, le $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ apparaît comme le métal le mieux toléré : le développement est maintenu jusqu'à 1000 ppm, bien qu'elle soit fortement réduite à 4000 ppm. Ces résultats confirment que la tolérance de la souche TBS 33 varie en fonction du type de métal, le plomb étant le moins toxique parmi ceux étudiés.

Par ailleurs, les analyses par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) ont montré des taux de réduction très élevés, supérieurs à 90 %. Cependant, ces résultats doivent être interprétés avec prudence, car l'étape de filtration peut entraîner une sous-estimation de la concentration résiduelle en piégeant partiellement les métaux avec la biomasse.

Globalement, *Aspergillus Niger* TBS 33 démontre un potentiel intéressant pour la bioremédiation, en particulier vis-à-vis du plomb, grâce à sa capacité d'absorption et sa relative robustesse. Ces travaux renforcent l'intérêt des champignons filamenteux comme agents biologiques durables pour la dépollution des sols et des eaux contaminés, en cohérence avec les principes de l'économie verte et de la gestion écoresponsable des ressources.

Chapitre 4 :

Biodégradation de la matière radioactive

Chapitre 4 : Biodégradation de la matière radioactive

Introduction

L'étude de la capacité de *TBS 33* à biodégrader des fertilisants contenant des éléments radioactifs a été menée dans une perspective de bioremédiation. Des échantillons de fertilisants contaminés ont été inoculés avec la souche fongique, puis incubés dans des conditions contrôlées favorables à la croissance du champignon. Afin d'évaluer l'efficacité de la biodégradation ou de la bioaccumulation des radionucléides, des mesures de radioactivité résiduelle ont été effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre gamma. Les résultats ont permis de comparer la radioactivité initiale et finale des échantillons, mettant en évidence une réduction potentielle du signal gamma dans les milieux traités avec *TBS 33*, suggérant une possible sorption, immobilisation, ou transformation biochimique des éléments radioactifs. Ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour l'utilisation de champignons filamenteux en tant qu'agents de dépollution des sols ou des matériaux contaminés par des substances radioactives.

1. Objectifs

Cette étude a pour objectif d'évaluer la capacité de la souche fongique *TBS 33* à biodégrader ou bioaccumuler des éléments radioactifs présents dans certains fertilisants contaminés. Plus précisément, il s'agit de déterminer si ce champignon peut contribuer à la réduction de la radioactivité par des mécanismes de biosorption, biotransformation ou immobilisation des radionucléides. Pour cela, une analyse comparative de la radioactivité des échantillons avant et après traitement fongique sera réalisée à l'aide d'une spectrophotométrie gamma, permettant de mesurer l'efficacité de la décontamination.

2. Matériel nécessaire

- Souche de champignons *Aspergillus* (*Aspergillus Niger* TBS 33)
- Échantillons de fertilisants contaminés par la radioactivité (isotopes sécurisés)
- Milieu de culture nutritif (agar ou milieu liquide)
- Spectromètre gamma pour la détection de la radioactivité.
- Matériel de culture (boîtes de pétrie, tubes à essai)

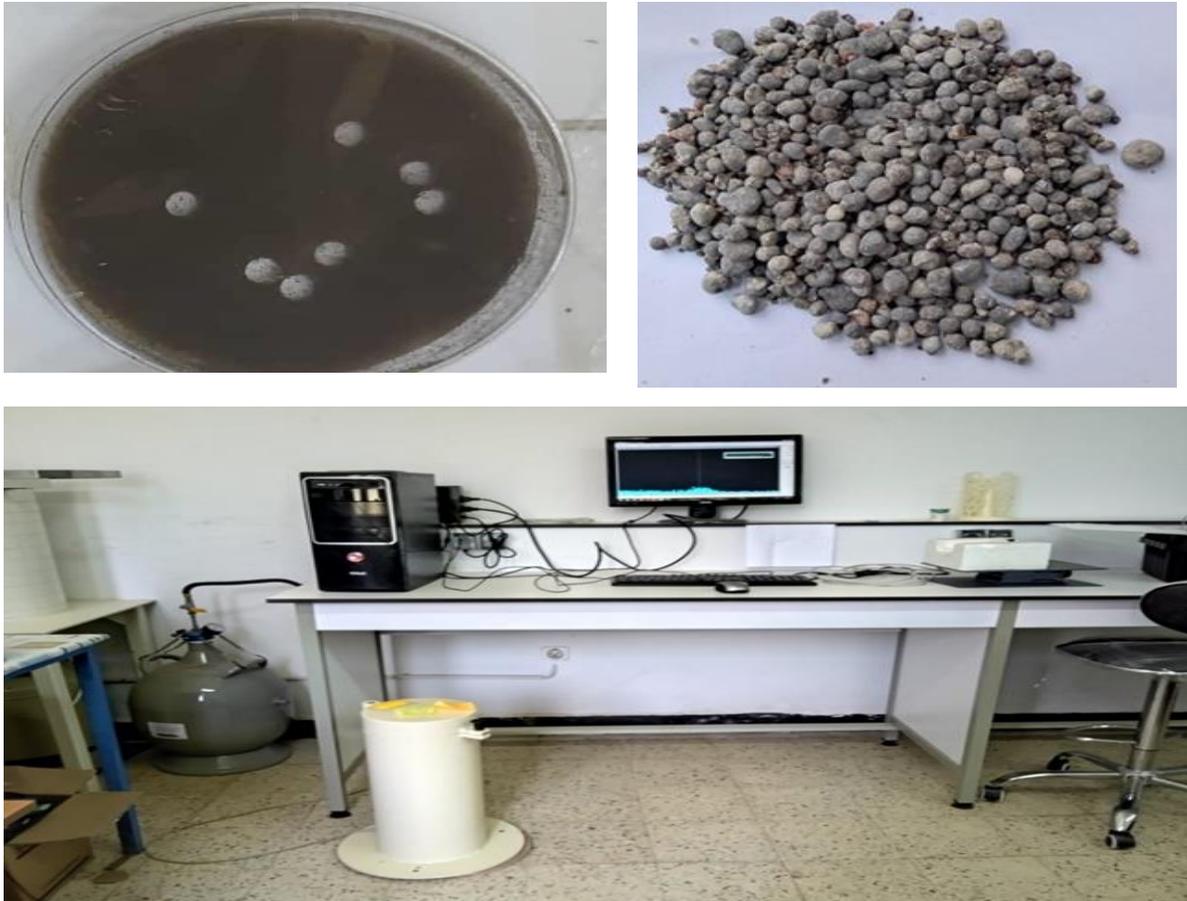


Figure 22: matériel utilisée

3. Pourquoi les fertilisants

Les fertilisants, en particulier ceux dérivés de phosphates naturels, sont souvent retenus dans les études de bioremédiation en raison de leur teneur notable en éléments radioactifs naturels, tels que le radium-226 (^{226}Ra), le thorium-232 (^{232}Th) et le potassium-40 (^{40}K). Les fertilisants de type NPK, qui combinent de l'azote (N), du phosphore (P) et du potassium (K), figurent parmi les engrais les plus largement utilisés en agriculture, en raison de leur efficacité à améliorer la fertilité des sols et à favoriser le rendement des cultures [178]. Cependant, les NPK formulés à partir de roches phosphatées peuvent être contaminés par des radionucléides naturellement présents dans les matières premières. L'application continue et à grande échelle de ces engrais entraîne une accumulation progressive de radioéléments dans les sols agricoles, posant des risques potentiels pour l'environnement, la santé humaine et la chaîne alimentaire [179,180].

Dans ce contexte, étudier l'interaction entre *TBS 33* et les fertilisants NPK contaminés permet d'explorer une approche biologique et durable pour réduire la radioactivité résiduelle. Une telle stratégie pourrait contribuer à la gestion écoresponsable des sols et à la prévention des risques liés à la pollution radioactive diffuse



Figure 23: Broyage d'engrais

4. Préparation des fertilisants NPK

Pour les besoins de l'étude, un échantillon homogène de fertilisants NPK a été préparé à partir d'un produit commercial standard, composé d'azote (N), de phosphore (P) et de potassium (K), avec des proportions 15-15-15 [181]. Le fertilisant a été broyé finement afin de faciliter sa dispersion dans le milieu d'expérimentation. Une quantité précise de poudre de NPK a ensuite été pesée (**20 g**) et diluée dans un volume de **100 ml** d'eau distillée stérile pour obtenir une suspension homogène. Cette suspension a été

Chapitre 4 : Biodégradation la matière radioactive

Stérilisée par autoclavage, puis incorporée dans des milieux de culture. La concentration finale en fertilisant dans chaque échantillon a été ajustée de manière à simuler des conditions environnementales réalistes, tout en assurant la présence mesurable de

Radionucléides naturels pour les analyses spectrométriques ultérieures.



Solution Patato Dextrose Agar (PDA) Solution Patato Doxtore Broth (PDB) Les deux solutions avec fertilisants

Figure 24 : Préparation des fertilisants NPK

5. Mesure de la Radioactivité

Avant le traitement biologique, les échantillons de fertilisants NPK ont été soumis à une analyse de radioactivité à l'aide d'un spectromètre gamma.

a) Principe de fonctionnement du spectromètre gamma :

Le spectromètre gamma est un instrument de mesure permettant de détecter et d'analyser les rayonnements gamma émis par des éléments radioactifs. Lorsqu'un isotope instable subit une désintégration radioactive, il émet des photons gamma caractéristiques de son identité. Le spectromètre gamma capte ces photons et mesure leur énergie et leur intensité [182].

Un spectromètre gamma utilisant un détecteur au NaI (TI) (iodure de sodium dopé au thallium) repose sur le phénomène de scintillation, c'est-à-dire la production de lumière visible lorsqu'un photon gamma interagit avec le cristal scintillateur. Lorsqu'un rayonnement gamma entre en collision avec le cristal NaI (TI), il transfère son énergie aux électrons de l'iodure de sodium,

Chapitre 4 : Biodégradation la matière radioactive

provoquant leur excitation [183,184]. Lorsque ces électrons reviennent à leur état fondamental, ils libèrent cette énergie sous forme de flashes lumineux (scintillations).

Le thallium (Tl), ajouté comme activateur, augmente l'intensité lumineuse de ces scintillations. La lumière produite est ensuite captée par un photomultiplicateur, un composant qui convertit les scintillations en impulsions électriques proportionnelles à l'énergie du photon gamma incident. Ces impulsions sont traitées par un analyseur multicanaux (MCA), qui les classe selon leur intensité et génère un spectre gamma : un graphique représentant le nombre de photons détectés en fonction de leur énergie [185].

Chaque pic d'énergie dans ce spectre correspond à un nucléide spécifique, permettant l'identification et la quantification des isotopes radioactifs présents dans l'échantillon.

b) Système de détection et d'analyse

La figure ci-dessous illustre la chaîne de mesure en spectrométrie gamma utilisant un détecteur à scintillation NaI (Tl).



Figure 25 : Chaîne spectrométrie Gamma utilisée

Le détecteur est enveloppé d'un blindage en plomb afin de réduire le bruit de fond dû à la radioactivité ambiante. Avant toute acquisition, plusieurs étapes de préparation sont nécessaires lors de la mise en service d'une nouvelle chaîne de spectrométrie gamma :

- La haute tension du photomultiplicateur est réglée à 900 volts pour assurer une amplification optimale du signal.
- Une calibration en énergie est réalisée à l'aide de deux sources radioactives étalon positionnées devant le détecteur :

Une fois le système calibré, les échantillons à analyser sont placés sur le détecteur pour une durée d'acquisition de 24 heures (soit 86 400 secondes), afin de garantir une mesure fiable et statistiquement significative de l'activité gamma.

c) Calibration de la chaîne de spectrométrie gamma

Calibration en énergie

La calibration en énergie est une étape essentielle permettant de convertir les numéros de canaux en valeurs d'énergie (keV), ce qui est indispensable pour identifier précisément les radionucléides présents dans un échantillon. Pour cette opération, le logiciel Maestro a été utilisé afin d'extraire et visualiser le spectre gamma généré par la chaîne de détection. Dans ce spectre, l'axe des abscisses représente les numéros de canaux, tandis que l'axe des ordonnées indique le nombre de photons détectés par canal.

L'étalonnage a été réalisé en vérifiant que les pics d'énergie correspondant aux photons gamma émis par des sources radioactives de référence apparaissent bien aux canaux attendus. Deux sources ponctuelles ont été utilisées, placées à l'avant du détecteur :

- ^{137}Cs , caractérisé par un pic unique à 661 keV,
- ^{60}Co , présentant deux pics caractéristiques à 1173 keV et 1332 keV.

Ces références permettent de tracer une courbe de calibration canal-énergie, généralement linéaire, qui servira pour l'interprétation des spectres mesurés sur les échantillons inconnus.



Figure 26 : Les sources de calibration

Pour chaque échantillon, une relation linéaire est établie entre les numéros de canaux de l'analyseur et les énergies connues des photons gamma. Cette relation, appelée droite de calibration, permet de convertir les canaux en énergies mesurables. Elle s'exprime sous la forme suivante :

$$Energie = A \times Canal + B$$

A présente le coefficient directeur et B l'ordonnée à l'origine.

En exploitant les données obtenues à partir des sources étalon utilisées pour la calibration (^{137}Cs et ^{60}Co) il est possible de déterminer cette droite de manière précise.

La droite de calibration obtenue pour est présentée dans la figure ci-contre.

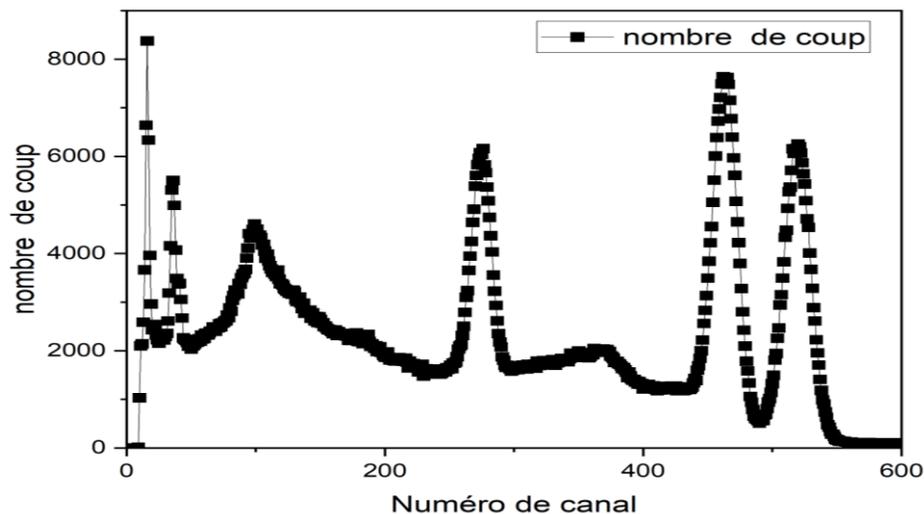


Figure 27 : Graphe de calibration (^{137}Cs et ^{60}Co)

$$E=a*C+ b$$

$$a=2.74301 \pm 0.00237$$

$$b=-94.52444 \pm 1.02269$$

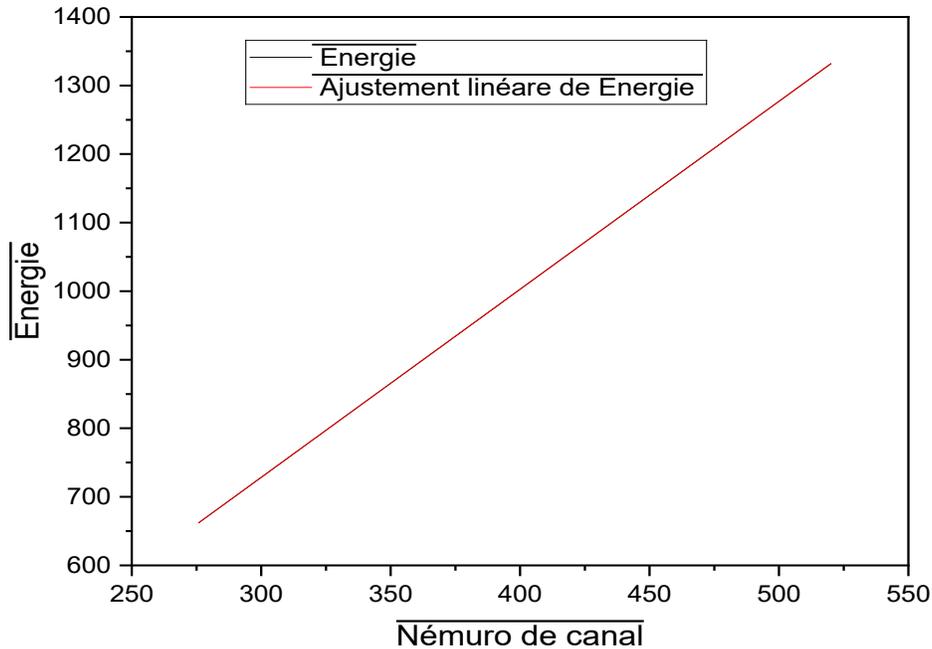


Figure 28 : Droite de calibration de l'échantillon

Après la calibration et la mesure du bruit de fond, les spectres obtenus ont été enregistrés puis analysés dans le but de quantifier l'intensité des rayonnements gamma émis. L'analyse a été basée sur la mesure de la surface des pics gamma correspondant aux isotopes détectés. L'activité n'a pas été calculée, car l'efficacité du système n'a pas pu être déterminée, notamment en raison de contraintes de temps.

6. Spectres de la radioactivité

Des mesures de la radioactivité des échantillons avant et après traitement fongique a été réalisée à l'aide de la spectrophotométrie gamma, permettant de déterminer l'efficacité de la décontamination.

a) Avant Traitement :

Afin d'évaluer la radioactivité des échantillons de fertilisants avant traitement, un spectre gamma a été enregistré pour l'échantillon témoin (à $t = 0$). Le spectre correspondant est présenté dans le graphique ci-dessous.

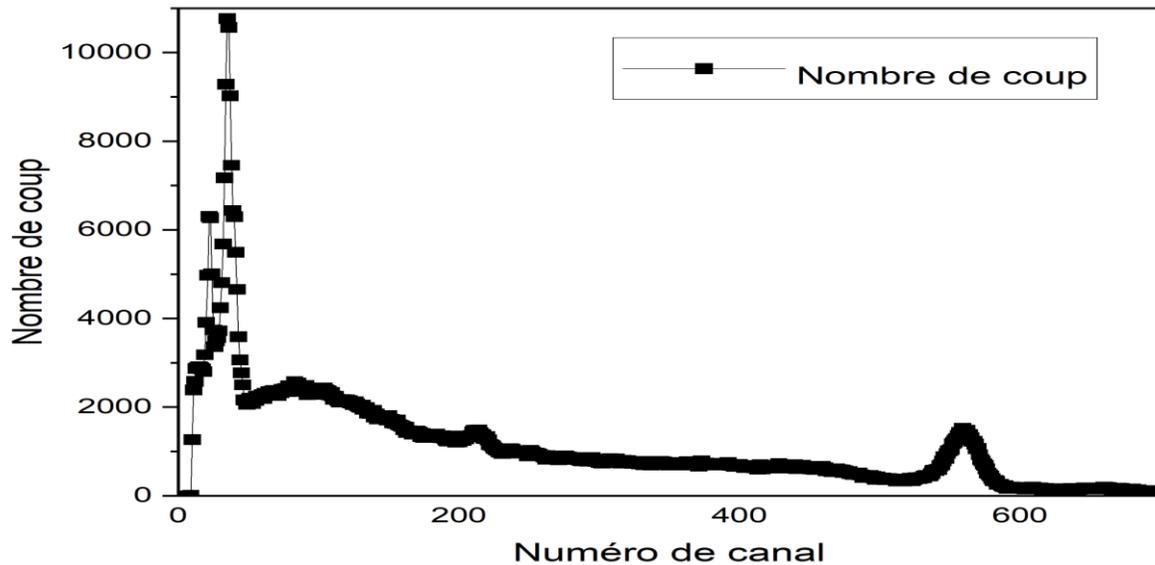


Figure 29: Spectre gamma a été enregistrée pour l'échantillon témoin (à $t = 0$)

Pour extraire davantage d'informations à partir du spectre, sans calculer directement la radioactivité, la surface du pic gamma, indicatrice de l'intensité du rayonnement, a été mise en évidence en rouge sur le graphique ci-dessous :

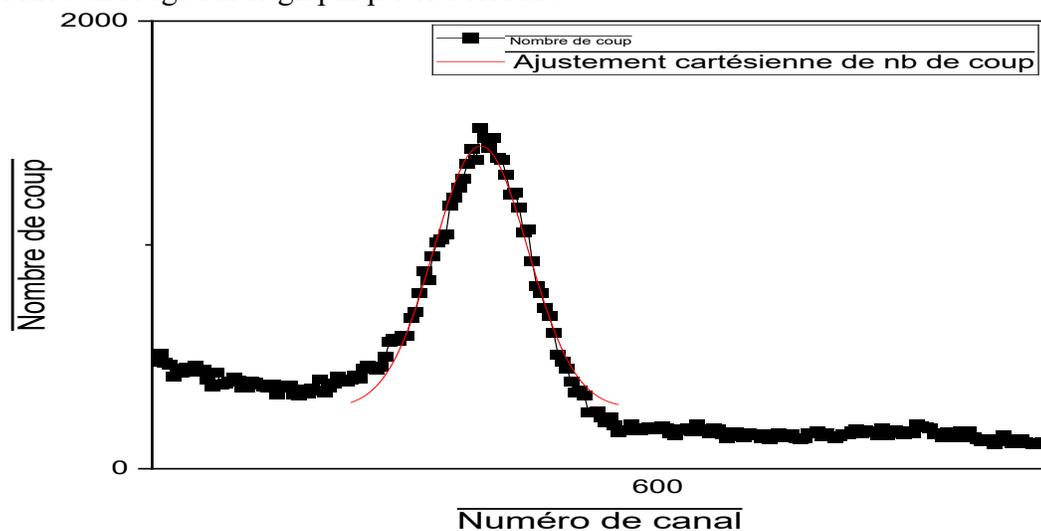


Figure 30 : Ajustement cartésienne de nombre de coup pour cellule la surface du pic gamma

"Le pic observé autour du canal 558.8, selon la droite de calibration, correspond à une énergie autour de 1439 qui correspond à l'isotope ^{40}K , caractérisé par une émission gamma à une énergie d'environ 1460 keV." Ce pic présente une surface autour de $31943.41921 \pm 1479.90227$

b) Après Traitement :

Après l'incubation des fertilisants contaminés avec la souche TBS 33 pendant des durées définies (8 jours entre 26 mai et le 2 juin et 18 jours entre 26 mai et le 12 juin), de nouveaux échantillons ont été prélevés pour une seconde mesure spectrométrique. Cette analyse post-traitement a permis de comparer les niveaux de radioactivité résiduelle avec les valeurs initiales. Toute diminution significative de l'activité gamma observée a été interprétée comme une indication potentielle de biosorption, bioaccumulation ou transformation des radionucléides par le champignon, apportant ainsi des éléments de réponse sur son efficacité en tant qu'agent de bioremédiation.

Dans un premier temps, une recalibration du système de spectrométrie gamma a été effectuée afin de garantir la fiabilité des mesures. Par la suite, la radioactivité du témoin (c'est-à-dire l'échantillon de fertilisant non traité par le champignon) a été de nouveau mesurée. Cette étape permet de mettre en évidence la dégradation naturelle, bien que généralement faible, des éléments radioactifs présents dans les fertilisants au cours du temps.

Les spectres enregistrés, illustrant l'évolution naturelle de la radioactivité sans intervention biologique, sont présentés ci-dessous.

Témoin 2 :

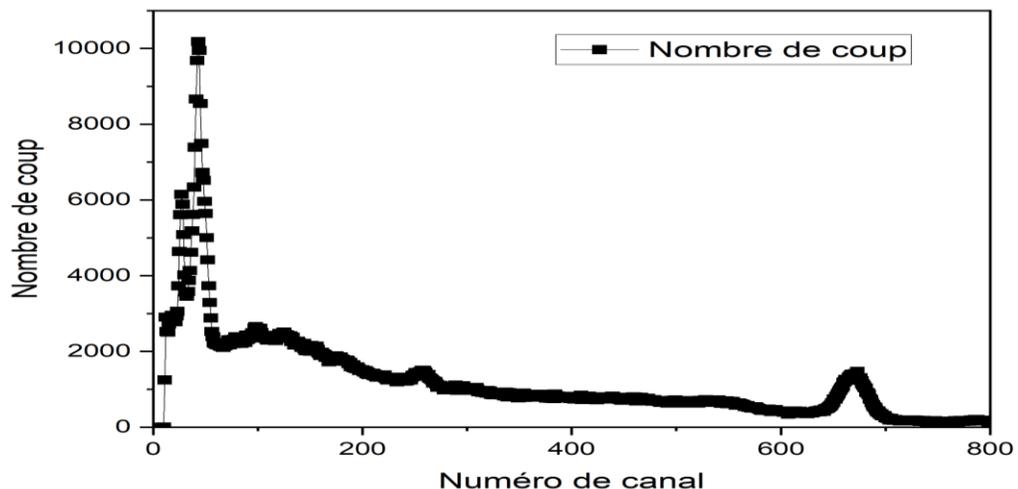


Figure 31: Spectre gamma a été enregistrée pour l'échantillon témoin 2

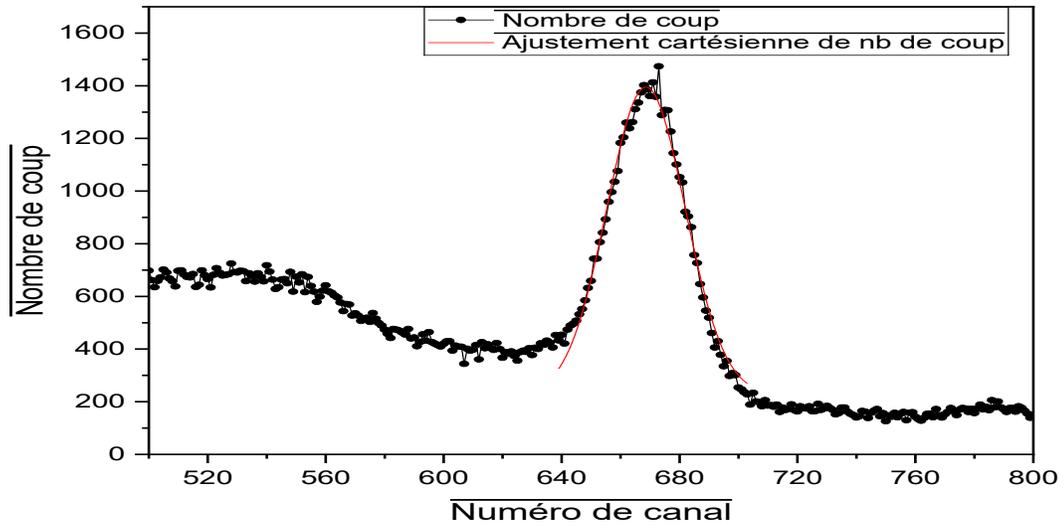


Figure 32 : Ajustement cartésienne de nombre de coup pour cellule la surface du pic gamma

Surface area = $38867.74238 \pm 1602.17524$

TBS33 (1 semaine)

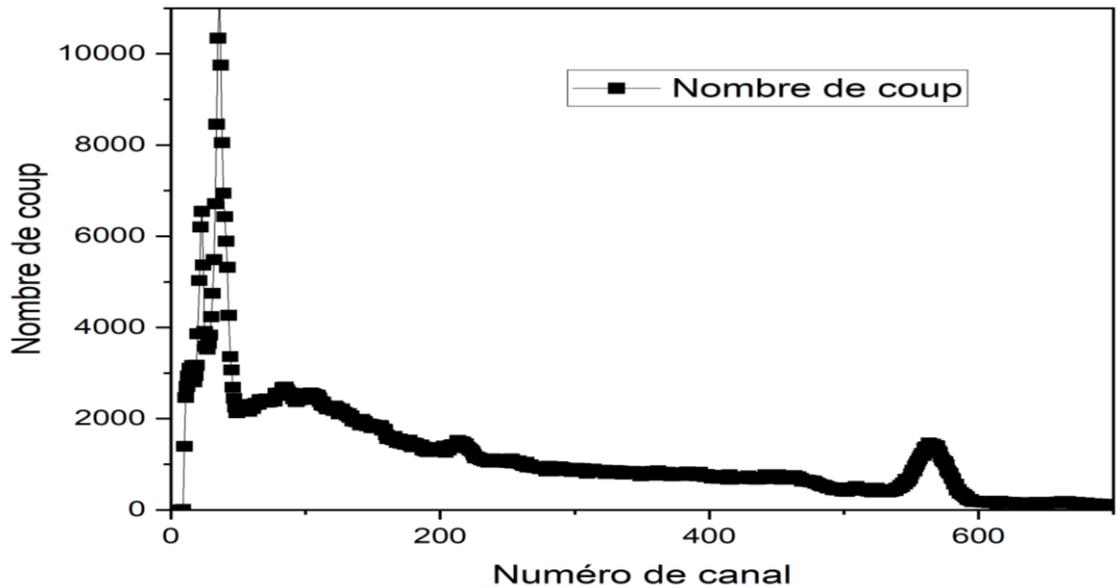


Figure 33 : Spectre gamma a été enregistrée pour l'échantillon TBS 33 (1 semaine)

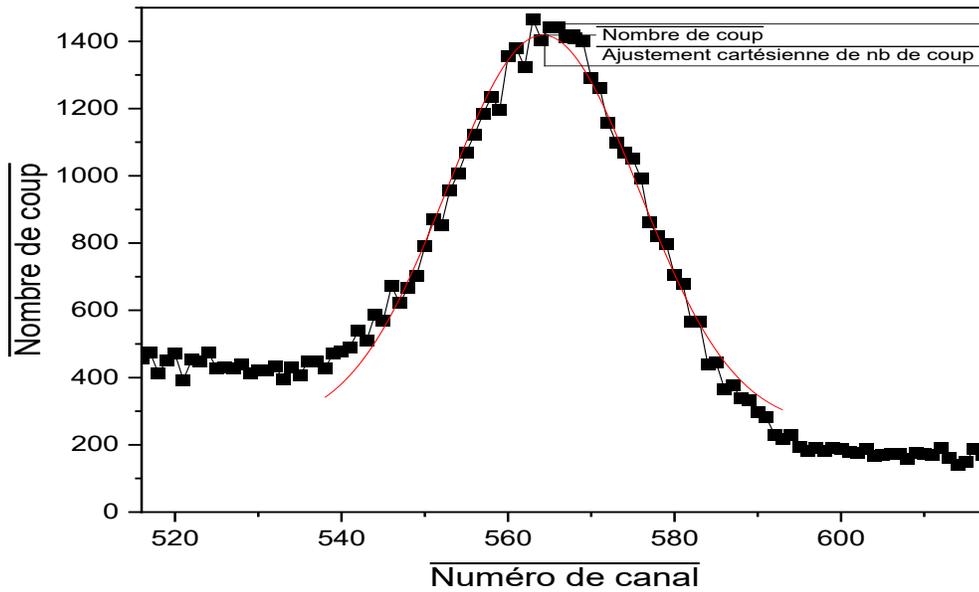


Figure 34 : Ajustement cartésienne de nombre de coup pour cellule la surface du pic gamma

Surface area = $33690.43695 \pm 1851.0659$

TBS33 (2 semaines):

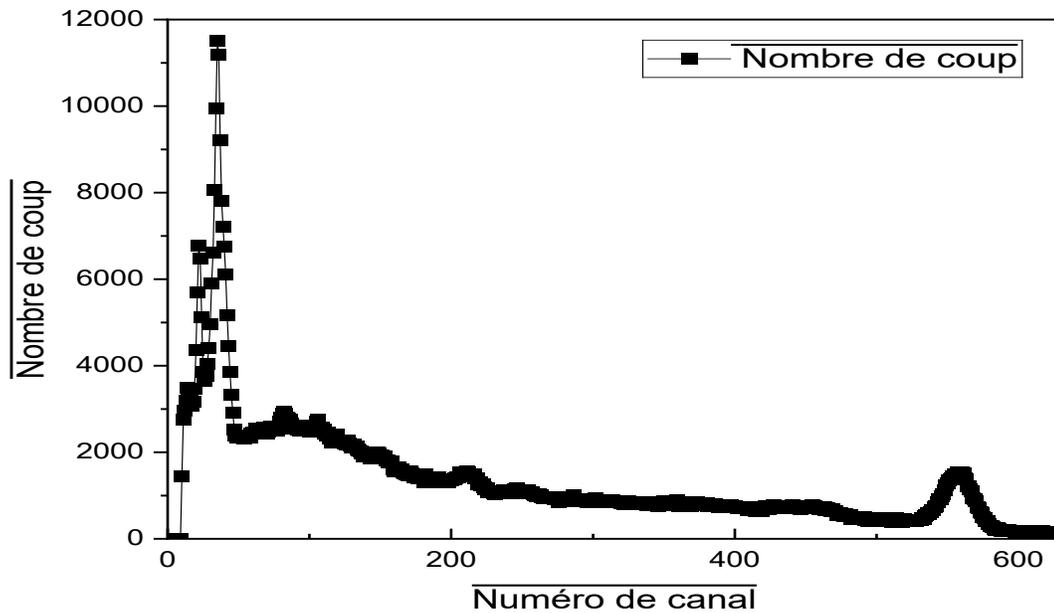


Figure 35 : Spectre gamma a été enregistrée pour l'échantillon TBS 33 (2 semaines)

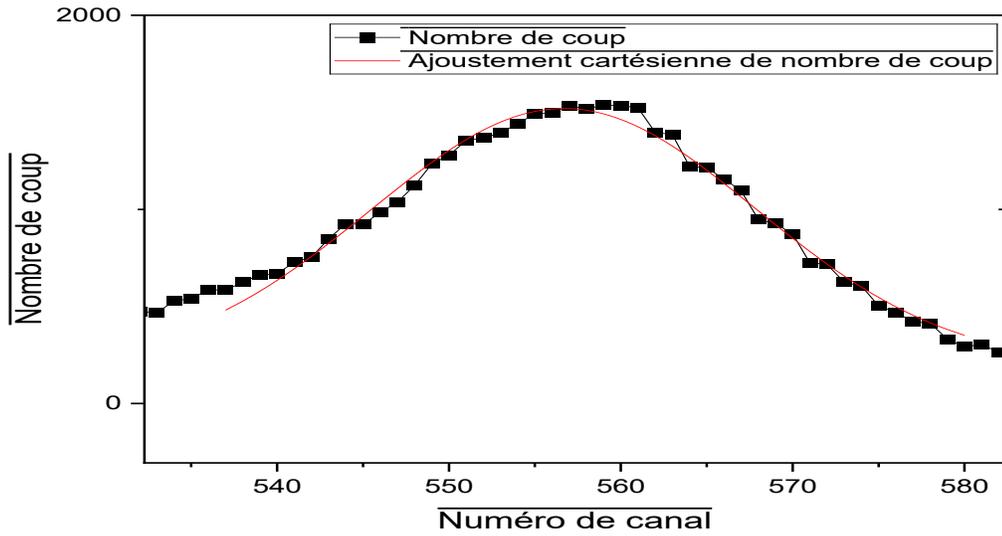


Figure 36 : Ajustement cartésienne de nombre de coup pour cellule la surface du pic gamma

Surface area = $33416.78243 \pm 2567.25974$

7. Analyse des résultats

Tableau 15 : Surfaces de pics (avec et sans traitement)

Les échantillons	Surface area
Témoin	$38867.74238 \pm 1602.1752$
TBS33 (1 semaine)	$33690.43695 \pm 1851.0659$
TBS33 (2 semaines)	$33416.78243 \pm 2567.2597$

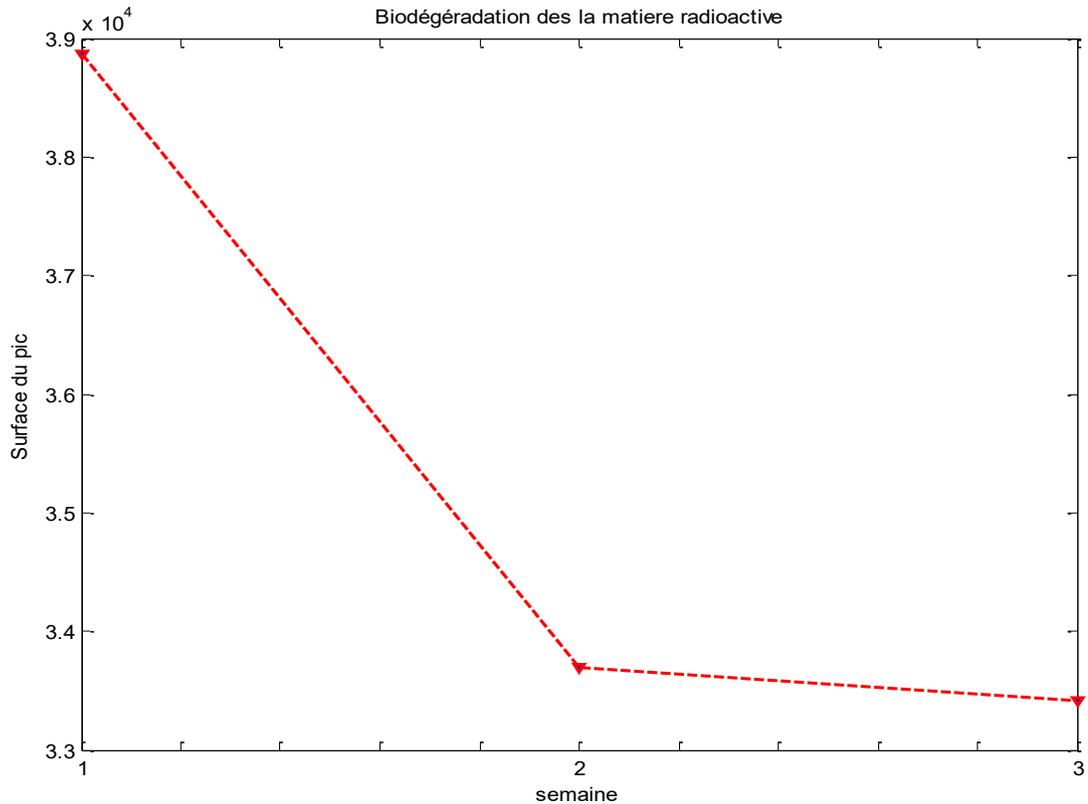


Figure 37: Biodégradation la matière radioactive

Interprétation des résultats :

- Réduction de la radioactivité après traitement fongique :

On observe une diminution notable de la surface de pic gamma dans les échantillons traités par TBS 33 :

- -13.4 % après 8 jours.
- -14.0 % après 18 jours.
- Cette réduction, comparée au témoin, dépasse la variabilité expérimentale (incertitude), ce qui suggère qu'elle n'est pas uniquement due à la dégradation naturelle des radionucléides.

Chapitre 4 : Biodégradation la matière radioactive

- Effet marginal du temps (8 vs 18 jours) :
 - La différence entre les valeurs à 8 et 18 jours est faible (~0,8 %), inférieure à l'incertitude de mesure.
 - Cela pourrait indiquer :
 - Soit que l'essentiel de l'activité biologique a eu lieu durant les 8 premiers jours,
 - Soit que le système atteint un plateau d'efficacité, avec une saturation de la capacité d'adsorption ou de transformation.
- Comparaison avec le témoin :
 - Le témoin montre la radioactivité initiale non altérée par l'activité fongique.
 - L'absence de forte baisse dans le témoin confirme que la diminution observée dans les échantillons traités est liée à l'action de TBS 33, et non à une désintégration spontanée significative des radionucléides.

Conclusion de chapitre :

Ces résultats suggèrent que *Aspergillus Niger* TBS 33 a un effet mesurable sur la réduction de la radioactivité gamma des fertilisants contaminés, probablement via biosorption, bioaccumulation ou biotransformation des radionucléides.

Cependant, la faible différence entre 8 et 18 jours indique une action rapide mais potentiellement limitée dans le temps.

Ces observations valident l'intérêt de TBS 33 pour la bioremédiation radioactive, tout en appelant à des investigations complémentaires pour :

Des résultats :

- Réduction de la radioactivité après traitement fongique :

On observe une diminution notable de la surface de pic gamma dans les échantillons traités par TBS 33 :

- -13.4 % après 8 jours.

Chapitre 4 : Biodégradation la matière radioactive

- -14.0 % après 18 jours.
- Cette réduction, comparée au témoin, dépasse la variabilité expérimentale (incertitude), ce qui suggère qu'elle n'est pas uniquement due à la dégradation naturelle des radionucléides.
- Effet marginal du temps (8 vs 18 jours) :
 - La différence entre les valeurs à 8 et 18 jours est faible (~0,8 %), inférieure à l'incertitude de mesure.
 - Cela pourrait indiquer :
 - Soit que l'essentiel de l'activité biologique a eu lieu durant les 8 premiers jours,
 - Soit que le système atteint un plateau d'efficacité, avec une saturation de la capacité d'adsorption ou de transformation.
- Comparaison avec le témoin :
 - Le témoin montre la radioactivité initiale non altérée par l'activité fongique.
 - L'absence de forte baisse dans le témoin confirme que la diminution observée dans les échantillons traités est liée à l'action de TBS 33, et non à une désintégration spontanée significative des radionucléides.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'ensemble des travaux menés dans cette étude souligne le potentiel remarquable de la souche fongique *Aspergillus Niger* TBS 33 en tant qu'agent biologique de bioremédiation, dans des contextes de contamination radioactive et métallique, ainsi que sous stress d'irradiation.

1. Effet des irradiations

L'analyse des effets des rayonnements gamma et neutroniques a permis de démontrer des réponses différenciées entre *Aspergillus niger* TBS 33 et *Penicillium sp.* (TCS 34). La souche TBS 33 a fait preuve d'une résilience significative face aux irradiations gamma, avec une sporulation encore détectable à 5 kGy, contrairement à *Penicillium sp.*, totalement inhibée dès 1 kGy. Sous irradiation neutronique, une stimulation transitoire de la sporulation a été observée, suivie d'un affaiblissement progressif lié à un stress cumulé. Ces résultats traduisent une capacité adaptative notable de TBS 33, qui pourrait être exploitée dans des environnements irradiés.

2. Dégradation des métaux lourds

Concernant la tolérance aux métaux lourds, *Aspergillus niger* TBS 33 s'est montrée particulièrement sensible au cuivre (CuSO_4), mais partiellement tolérante au cadmium (CdCl_2) et plus résistante au plomb ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$), avec un développement maintenu jusqu'à 1000 ppm. Les analyses par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) ont révélé des taux de réduction dépassant 90 %, bien qu'ils soient à interpréter prudemment à cause des biais liés à la filtration. Ces résultats indiquent un fort potentiel biosorbant, notamment pour le plomb.

3. Réduction de la radioactivité

L'étude de la biodégradation des fertilisants contaminés a montré que *Aspergillus niger* TBS 33 peut réduire la radioactivité gamma de manière mesurable dès les premiers jours de traitement. La stabilité des résultats entre 8 et 18 jours suggère une efficacité rapide mais à effet plafonné, appelant à des travaux supplémentaires pour mieux comprendre les mécanismes impliqués, affiner la cinétique du processus, et optimiser les conditions de traitement.

Conclusion générale

Perspectives

Ces résultats confirment l'intérêt de *Aspergillus Niger* TBS 33 comme biocatalyseur écologique capable d'agir à la fois sur des polluants métalliques et radioactifs, et de résister à des environnements hostiles, notamment irradiés. Cette souche s'inscrit pleinement dans une démarche de biotechnologie durable, avec des applications prometteuses en dépollution de sols, d'eaux ou de déchets industriels. Toutefois, des études complémentaires seront nécessaires pour valider son efficacité à plus grande échelle, en conditions réelles et sur le long terme.

Références

- [1] Talreja, Neetu, et al. "Emerging Environmental Contaminants : Sources, Consequences and Future Challenges." *Green Technologies for Industrial Contaminants* (2025) : 119-149.
- [2] Saidon, Nadhirah B., et al. "Trophic transfer and biomagnification potential of environmental contaminants (heavy metals) in aquatic ecosystems." *Environmental pollution* 340 (2024): 122815.
- [3] Masindi, Vhahangwele, and Khathutshelo L. Muedi. "Environmental contamination by heavy metals." *Heavy metals* 10.4 (2018): 115-133.
- [4] El-Sharkawy, Mahmoud, et al. "Heavy Metal Pollution in Coastal Environments: Ecological Implications and Management Strategies: A Review." *Sustainability* 17.2 (2025): 701.
- [5] Musah, Baba Imoro. "Effects of heavy metals and metalloids on plant-animal interaction and biodiversity of terrestrial ecosystems—An overview." *Environmental Monitoring and Assessment* 197.1 (2025) : 1-26.
- [6] Shetty, B. Raksha, Pai B. Jagadeesha, and S. A. Salmataj. "Heavy metal contamination and its impact on the food chain: exposure, bioaccumulation, and risk assessment." *CyTA-Journal of Food* 23.1 (2025) : 2438726.
- [7] Babaniyi, Babafemi Raphael, et al. "Environmental Pollution and the Entrance of Toxic Elements into the Food Chain." *Phytoremediation in Food Safety*. CRC Press, 2025. 109-124.
- [8] Kravchenko, Ekaterina, et al. "Ecological and health risk assessments of heavy metal contamination in soils surrounding a coal power plant." *Journal of Hazardous Materials* 484 (2025): 136751.
- [9] Jomova, Klaudia, et al. "Heavy metals: toxicity and human health effects." *Archives of toxicology* 99.1 (2025): 153-209.
- [10] Oyewumi, Olusola, et al. "Health risk assessment of potential heavy metals bioaccumulation in specialty crops grown in farm soils amended with dredged material." *Journal of Environmental Management* 375 (2025): 124332.
- [11] Shuaibu, Nuhu Auwal, and Sara Cristina Caldeira Laranjeira. "Impacts of Heavy Metals in Soil on Human Health."
- [12] Barik, Debashis, et al. "Environmental Pollutants Such as Endocrine Disruptors/Pesticides/Reactive Dyes and Inorganic Toxic Compounds Metals, Radionuclides, and Metalloids and Their Impact on the Ecosystem." *Biotechnology for Environmental Sustainability*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. 391-442.
- [13] Abiamas, P. Ele, JM Ema'A. Ema'a, and G. H. Ben-Bolie. "Impact of Radioactive Soil." *Radionuclide Uptake in Food and Consequences for Humans* (2025): 55.
- [14] Subramanian, Abirami, and Sushmitha Baskar. "Biomineralization of Toxic Chemicals and Radionuclides by Geomicrobes." *Mineral Transformation and Bioremediation by Geo-Microbes*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. 89-104.
- [15] Egbueri, Johnbosco C., et al. "Radionuclides as Environmental Contaminants of Concern: Threats to Public Health Through Soil and Groundwater." *Sustainable Groundwater and Environment: Challenges and Solutions*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. 333-364.
- [16] Xu-Yang, Yangjunjie, et al. "Radioactive contamination transported to Western Europe with Saharan dust." *Science Advances* 11.5 (2025) : eadr9192.
- [17] Elgadaiame, Adnan A. Frag, Narjes Nasr Riheel, and Salwa Muftah Eljamay. "Public Perceptions and Awareness of Radioactive Pollution." *Derna Academy Journal for Applied Sciences* 3.2 (2025): 133-139.
- [18] Rathnayake, RMN Priyanga, and Dulanjalee Rajapaksha. "Nuclear and Radioactive Marine Pollution and Monitoring of Radioactivity in Oceans." *Coastal and Marine Pollution: Source to Sink, Mitigation and Management* (2025): 197-215.
- [19] Rethinasabapathy, Muruganatham, et al. "Recent progress in advanced functional materials for adsorption and removal of cobalt from industrial and radioactive effluents." *Coordination Chemistry Reviews* 527 (2025): 216401.
- [20] S Caparic, Jasper, et al. "Comparative Risk Review of Major Nuclear Disasters: Analyzing Radiation Exposure, Environmental Impact and Health Consequences Across the Worst Accidents." *International Journal of Innovative Science and Research Technology* 10.3 (2025): 717-726.
- [21] Thakur, Suman, et al. "Environmental Pollutants: Endocrine Disruptors/Pesticides/Reactive Dyes and Inorganic Toxic Compounds Metals, Radionuclides, and Metalloids and Their Impact on the Ecosystem." *Biotechnology for Environmental Sustainability*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. 55-100.

Références

- [22] Barik, Debashis, et al. "Environmental Pollutants Such as Endocrine Disruptors/Pesticides/Reactive Dyes and Inorganic Toxic Compounds Metals, Radionuclides, and Metalloids and Their Impact on the Ecosystem." *Biotechnology for Environmental Sustainability*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. 391-442.
- [23] Zhang, Mengke, et al. "Simulating Anomalous Migration of Radionuclides in Variably Saturation Zone Based on Fractional Derivative Model." *Water* 17.9 (2025): 1337.
- [24] Kanmi, Adegbulugbe Samuel, et al. "Assessment of natural radioactivity and its radiological risks in the soil of local government areas (Asa, Ilorin East, Ilorin South, Irepodun, Moro, and Oyun) in Kwara State, Nigeria." *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 11 (2025): 101040.
- [25] Wais, Taha Yaseen, et al. "Natural and artificial radioactivity levels in the agricultural soil of lands near the Al-Kasak oil refinery, northern Iraq." *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 334.2 (2025): 1471-1484.
- [26] Lin, Hai, et al. "Technologies for removing heavy metal from contaminated soils on farmland: A review." *Chemosphere* 305 (2022): 135457.
- [27] ur Rehman, Zia, et al. "Remediation methods of heavy metal contaminated soils from environmental and geotechnical standpoints." *Science of The Total Environment* 867 (2023): 161468.
- [28] Maqsood, Quratulain, et al. "Novel strategies and advancement in reducing heavy metals from the contaminated environment." *Archives of Microbiology* 204.8 (2022): 478.
- [29] Obi, Linda U., et al. "Application of Endophytes in Bioremediation, Biotransformation, and Water Disinfection for Irrigation Systems." *Enhancing Water and Food Security Through Improved Agricultural Water Productivity: New Knowledge, Innovations and Applications*. Singapore : Springer Nature Singapore, 2025. 117-137.
- [30] Zhou, Biao, Tiejian Zhang, and Fei Wang. "Microbial-based heavy metal bioremediation: Toxicity and eco-friendly approaches to heavy metal decontamination." *Applied Sciences* 13.14 (2023): 8439.
- [31] Atuchin, Victor V., et al. "Microorganisms for bioremediation of soils contaminated with heavy metals." *Microorganisms* 11.4 (2023): 864.
- [32] Chernysh, Yelyzaveta Yuriivna, et al. "Application of technological solutions for bioremediation of soils contaminated with heavy metals." (2021).
- [33] Saez, Juliana M., et al. "Enhancing environmental decontamination and sustainable production through synergistic and complementary interactions of actinobacteria and fungi." *Heliyon* (2025).
- [34] Hassan, Auwalu, et al. "Field application of arbuscular mycorrhizal fungi and *Alocasia calidora* (Schott) G. Don for effective remediation of heavy metal/metalloid-polluted landfill soil." *Environmental Science and Pollution Research* (2025): 1-23.
- [35] Ali, Zain, et al. "Advances in myco-remediation strategies for emerging contaminants: a comprehensive review." *Bioremediation Journal* (2025): 1-37.
- [36] Tibolla, Matheus Henrique, and Janaina Fischer. "Radiotrophic fungi and their use as bioremediation agents of areas affected by radiation and as protective agents." *Research, Society and Development* 14.1 (2025): e2514147965-e2514147965.
- [37] Pandey, Vinay Kumar, Sarvesh Rustagi, and Gurmeet Singh. "The Role of Mycoremediation in the Circular Economy." *Sustainable Remediation for Pollution and Climate Resilience*. Springer, Singapore, 2025. 421-441.
- [38] Júnior, Diniz Pereira Leite, et al. "The Rise of Fungi: Evidence on the Global Scale. Old Known Silences or Mysterious Threats to the Planet." *Microbiol. Res. J. Int* 2 (2020): 18-49.
- [39] Zerbini, Micol. *The impact of radioactive metals on marine ecosystems: in vivo speciation and molecular mechanisms of the uptake by brown algae*. Diss. Université Côte d'Azur, 2025.
- [40] Locke, Bruce R., Erin Petkus, and Cesar Rodriguez. "Perspectives on Coupling Nonthermal Plasma Generated in Gas-Liquid Water Environments with Microbes." *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 45.1 (2025): 463-483.
- [41] Cruz, Román Adrián González, Alonso Ezeta Miranda, and Israel Valencia Quiroz. "Biological Treatment of Wastewater: Use of Microorganisms for Purification." *Soil Improvement and Water Conservation Biotechnology*. Bentham Science Publishers, 2025. 183-204.
- [42] Zaimenko, Nataliia, Anastasiia Lahoiko, and Alexandr Slyusarenko. "Potential Application of Melanins for Restoring War-affected Soils in Ukraine." *Agrobiodiversity for Improving Nutrition, Health and Life Quality* 9.1 (2025).
- [43] Talal, Muhammad, et al. "A Critical Review: Unearthing the Hidden Players—The Role of Extremophilic Fungi in Forest Ecosystems." *Forests (19994907)* 16.5 (2025).

Références

- [44] Cassaro, Alessia, et al. "Biomarker Preservation in Antarctic Sandstones after Prolonged Space Exposure Outside the International Space Station During the ESA EXPOSE-E Lichens and Fungi Experiment." *Astrobiology* 25.5 (2025): 331-345.
- [45] Ramírez, Jonathan Bonet, et al. "Comparison of radiobiological effects induced by radiolabeled antibodies in human cancer cells and fungal cells." *International Journal of Radiation Biology* 101.5 (2025): 521-530.
- [46] Thakur, Suman, et al. "Environmental Pollutants: Endocrine Disruptors/Pesticides/Reactive Dyes and Inorganic Toxic Compounds Metals, Radionuclides, and Metalloids and Their Impact on the Ecosystem." *Biotechnology for Environmental Sustainability*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. 55-100.
- [47] Ahmad, Zeeshan, et al. "Proteomic profiling reveals immunomodulatory role of IL-33 in ocular bacterial and fungal infections." *Infection and Immunity* (2025): e00183-25.
- [48] Inukai, Tatsuya, et al. "Fungus-targeted nanomicelles enable microRNA delivery for suppression of virulence in *Aspergillus fumigatus* as a novel antifungal approach." *Scientific Reports* 15.1 (2025): 1-9.
- [49] Shourie, Abhilasha, and U. Vijayalakshmi. "Fungal diversity and its role in mycoremediation." *Geomicrobiology Journal* 39.3-5 (2022): 426-444.
- [50] Cetina, Ivana. "Radiological decontamination methods: challenges and perspectives." *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry* 334.2 (2025): 1093-1106.
- [51] Mitra, Anindita, et al. "Microbial Intervention in Augmenting Radionuclide Contamination from Topsoil." *Radionuclide Uptake in Food and Consequences for Humans*. 2025. 299-323.
- [52] Zabirova, Aizhan, et al. "Understanding public trust in information about interim nuclear waste storage: The roles of acceptance, gender, and proximity." *PLoS One* 20.5 (2025): e0323896.
- [53] Simões, M. F., et al. "The relevance of fungi in astrobiology research—Astromycology." *Mycosphere* 14.1 (2023): 1190-1253.
- [54] Rao, T. Subba, et al. "Bioremediation: A Promising Technology for Radionuclides and Explosive Compounds." *Handbook of Metal-Microbe Interactions and Bioremediation*. CRC Press, 2017. 747-768.
- [55] Ngulimi, Miguta Faustine, et al. "Nuclear Decommissioning and Sustainable Environment: Insights on Decontamination Processes." *Advanced Energy and Sustainability Research* 6.1 (2025): 2400243.
- [56] Yadav, Pooja, et al. "Green decontaminants for the remediation of chemical, biological, radiological and nuclear contaminants." *Phytochemistry Reviews* (2025): 1-46.
- [57] Thakur, Abhinav, and Ashish Kumar. "Emerging paradigms into bioremediation approaches for nuclear contaminant removal: From challenge to solution." *Chemosphere* 352 (2024): 141369.
- [58] Srinath, N., et al. "Biotechnological Innovations in Radioactive Waste Management Technologies." *Radioactive Pollutant: Sources, Issues and Remediation*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. 137-173.
- [59] Island, Three Mile. "Trois accidents nucléaires marquants, leurs causes et leurs conséquences : Three Mile Island, Tchernobyl, Fukushima."
- [60] Mehic, Adrian. "The electoral consequences of environmental accidents: Evidence from Chernobyl." *Journal of Public Economics* 225 (2023): 104964.
- [61] Jargin, Sergei V. "Chernobyl consequences are coming." *Journal of Radiological Protection* 42.1 (2022) : 014501.
- [62] Onischenko, G. G., A. Yu Popova, and I. K. Romanovich. "Radiological consequences and lessons of the Chernobyl NPP and «Fukushima-1» NPP radiation accidents." *Radiatsionnaya Gygiena= Radiation Hygiene* 14.1 (2021) : 6-16.
- [63] Burraco, Pablo, et al. "Lack of impact of radiation on blood physiology biomarkers of Chernobyl tree frogs." *Frontiers in Zoology* 18 (2021): 1-10.
- [64] Cléro, Enora, et al. "Conséquences sanitaires 35 ans et 10 ans après les accidents nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima." *Environnement, Risques & Santé* 20.6 (2021) : 525-534.
- [65] Kulkarni, Prutha Prashant, and Parikshit N. Mahalle. *Electromagnetic Radiations: Exposure and Impact*. CRC Press, 2025.
- [66] Häring, Carola, et al. "What does Germany think about radiation: Survey 2024." (2025).
- [67] Strunga, Vladimír, et al. "Radiation-enhanced fluid diffusion and alteration around uraniferous inclusions in Cenomanian resinite from North Bohemia." *Chemical Geology* 673 (2025): 122554.
- [68] [Marković, Srdjan Z., and Miloš D. Mojović. "Biological Effects of Ionizing Radiation A." *Hospital Pharmacology-International Multidisciplinary Journal* 12.1 (2025): 1573-1591.

Références

- [69] Beyzadeoglu, Murat, Gokhan Ozyigit, and Ugur Selek. "Radiation physics." *Radiation Oncology: A MCQ and Case Study-Based Review*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2025. 1-74.
- [70] Rousseau, David. *Rayonnements UV et dommages aux cellules*. MSEI – MultiSciences Expertises Inc., 14 juin 2024, www.msei.ca/rayonnements-uv-et-dommages-aux-cellules/
- [71] Bai, Jinhui, et al. "Electron spin polarization around magnetic nodes under the chirped rotating electric field." *Physical Review A* 111.5 (2025): 052815.
- [72] Schiff, Joel L. "Let There Be Light." *Basic Mathematical Insights into Astrophysics*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2025. 31-52.
- [73] Hays, Zane B., et al. "Radiation Protection Systems: A Review of Active and Passive Interplanetary Protection Systems and Introduction to a Proposed Mathematical Model for Magnetic Shielding." *AIAA SCITECH 2025 Forum*. 2025.
- [74] Ahmada, Nasuha, et al. "Radiation-Induced Damage to Concrete Biological Shielding Materials: A State-of-The-Art Review." *Jurnal Kejuruteraan* 37.1 (2025): 97-135.
- [75] Zhang, Yadong, et al. "Comprehensive physical evaluation of potential CT contrast agents: Integrating Monte Carlo transport simulation and radiation shielding analysis." *Radiation Medicine and Protection* (2025).
- [76] Pereira, Aricson, Gowtham Nakka, and Sakshi Gupta. "Beyond Ethylene Oxide (EtO): A comprehensive review of sustainable sterilization technologies for medical devices." *Biomedical and Therapeutics Letters* 12.2 (2025): 1161-1161.
- [77] Tableau adapté à partir de sources générales sur le spectre électromagnétique. De la référence précédente Rousseau, David. *Rayonnements UV et dommages aux cellules*. MSEI – MultiSciences Expertises Inc., 14 juin 2024, www.msei.ca/rayonnements-uv-et-dommages-aux-cellules/
- [78] Codrean, Andrea-Florina, Octavian Madalin Bunoiu, and Marius Paulescu. "Identifying the Signature of the Solar UV Radiation Spectrum." *Atmosphere* 16.4 (2025): 427.
- [79] Ghosh, Sayantan, et al. "Biomedical Imaging: State of the Art." *Multimodal Biomedical Imaging Techniques* (2025): 1-31.
- [80] KUMAR, VIKAS, and SANDEEP KUMAR TYAGI. "The Role of UV Radiation in Pesticide Degradation: Mechanisms, Challenges, and Future Perspectives." *Multidisciplinary Research Area in Arts, Science & Commerce (Volume-1)* (2025): 54
- [81] Gkikoudi, Angeliki, et al. "Synergistic Effects of UVB and Ionizing Radiation on Human Non-Malignant Cells: Implications for Ozone Depletion and Secondary Cosmic Radiation Exposure." *Biomolecules* 15.4 (2025): 536
- [82] Ng, Mitchell K., Michael A. Mont, and Peter M. Bonutti. "Clinical and Environmental Harms of Quaternary Ammonium Disinfectants and the Promise of Ultraviolet-C (UV-C) Alternatives: A Narrative Review." *Cureus* 17.5 (2025).
- [83] Cai, Jiaqi, Xueru Zhang, and Zhengjun Liu. "X-ray Imaging." *High Throughput Imaging Technology*. Singapore : Springer Nature Singapore, 2025. 207-243.
- [84] Weng, Zhengqiu, et al. "AI-enhanced X-ray spectrum reconstruction for medical imaging system." *Applied Radiation and Isotopes* 217 (2025): 111663
- [85] Mondal, Angana, et al. "A compact laser-plasma source for high-repetition-rate bi-modal X-ray and electron imaging." *arXiv preprint arXiv:2504.17560* (2025).
- [86] Anfimov, Nikolay, and Alexander Selyunin. "LABORATORY PRACTICUM: DOSIMETRY AND GAMMA SPECTROMETRY."
- [87] Wada, Yuuki, et al. "Downward terrestrial gamma-ray flash associated with collision of lightning leaders." *Science Advances* 11.21 (2025): eads6906
- [88] Effarah, Haytham Henry. *Ultra-High Dose Rate Electron Irradiation Using a Distributed Charge Compton X-Ray Source Architecture*. Diss. University of California, Irvine, 2025
- [89] Macha, Michal, et al. "Effects of Radiation Dose on Lubricants: A Review of Experimental Studies." *ACS Applied Materials & Interfaces* 17.10 (2025): 14773-14800
- [90] Zuo, Shiyu, et al. "Rethinking strategies to attenuate organic pollutants: Mechanisms and challenges of catalytic pollutants polymerization." *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 55.3 (2025): 169-189.

Références

- [91] Fartode, Anoop P., S. A. Fartode, and Tushar R. Shelke. "Gamma Radiolytic Degradation Study of Erythrosine Dye." (2025).
- [92] Hashemi, Mehrdad, et al. "Autophagy in the Regulation of Radio-Resistance." *Autophagy, Apoptosis and Ferroptosis in Oncology: Cell Death and Cancer*. 2025. 143-173.
- [93] Hashemi, Mehrdad, et al. "Ferroptosis and Cancer Radio-Resistance." *Autophagy, Apoptosis and Ferroptosis in Oncology: Cell Death and Cancer*. 2025. 787-819.
- [94] Bouffard, Serge. *A Historical Approach to Materials Under Irradiation*. John Wiley & Sons, 2025.
- [95] Seifert, Norbert, et al. "On the Single Event Upset Susceptibility of 10nm SRAM Devices to Ionizing
- [96] Tableau adapté à partir de sources générales sur le spectre électromagnétique. Des les références précédente Rousseau,
- [97] Hrangkhawl, Wilson. "FUNDAMENTALS OF RADIATION PHYSICS."
- [98] ZAIDI, Omar. *Description des effets post-collisionnels dans les réactions d'ionisation d'atomes par impact d'électrons et de positrons*. Diss. 2025
- [99] Diop, Abdou Camara. "Caractérisations physico-chimique et minéralogique de deux argiles de Kindia (Guinée Conakry) utilisées dans la construction." (2025).
- [100] Liu, Xiemin, et al. "Scale-up of Microdroplet Reactors for Efficient CO2 Resource Utilization." *Journal of the American Chemical Society* (2025)
- [101] Wessapan, Teerapot, et al. "Comparative Analysis of Heat Transfer Dynamics in High-intensity Focused Ultrasound and Microwave Ablation for Cancer Treatment." *International Journal of Thermofluids* (2025): 101090.
- [102] Zhang, Hongmingjian, et al. "The pyrolysis behavior of typical epoxy/amine system: From degradation product to the mechanism of chemical bond breakage." *Sustainable Materials and Technologies* (2025): e01297.
- [103] Pooja, Gori, Singh Shweta, and Pratixa Patel. "Oxidative stress and free radicals in disease pathogenesis: A review." *Discover Medicine* 2.1 (2025): 104.
- [104] Ghanim, Ihsan R., et al. "Effect of embedding WO3NPs on the structural, morphological, optical, and dielectric properties of PVA-CMC-PEG polymeric matrix towards optoelectronic and energy storage applications." *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials* 35.2 (2025): 1143-1151.
- [105] Zhou, Xuyang, et al. "Materials Design by Constructing Phase Diagrams for Defects." *Advanced Materials* 37.3 (2025): 2402191.
- [106] An, Baoyi, et al. "Scintillators for Neutron Detection and Imaging: Advances and Prospects." *Advanced Functional Materials* 35.19 (2025): 2422522.
- [107] Zheng, Yisheng, et al. "Hypergravity promoted mechanical degradation in CuZn alloy." *Materialia* 39 (2025): 102338.
- [108] Basu, Naveen. *Exploring Particles and Nuclei*. Educohack Press, 2025.
- [109] Hsu, Liang-Yan. "Chemistry Meets Plasmon Polaritons and Cavity Photons: A Perspective from Macroscopic Quantum Electrodynamics." *The Journal of Physical Chemistry Letters* 16 (2025): 1604-1619.

Références

- [110] Chai, Jianlong, et al. "Synergistic Effects of He, Fe, and Deuterium Ions on Tungsten." *International Journal of Mechanical Sciences* (2025): 110306.
- [111] Stanovohh, Ilja. "Investigation of temperature effects on damage accumulation in nickel-based alloys with the use of MD with two-temperature model." (2025).
- [112] Salah, Ahmed Ragab Mahmoud. "Nuclear Binding Energy Concepts, Calculations, and Applications." (2025).
- [113] Ahmada, Nasuha, et al. "Radiation-Induced Damage to Concrete Biological Shielding Materials: A State-of-The-Art Review." *Jurnal Kejuruteraan* 37.1 (2025): 97-135.
- [114] Sakthimurugan, Veeraraghavan, and Devarajan Yuvarajan. "A comprehensive assessment on recent advancements in spent fuel reprocessing and waste management: pioneering technologies for a sustainable nuclear future." *Kerntechnik* 90.2 (2025) : 125-138.
- [115] Wiescher, Michael. *Radioactivity-Two-Volume Set*. CRC Press, 2025.
- [116] Hussain, Saqib, et al. "From Atomic Nuclei to Nanostructures: Harnessing the Convergence of Nuclear Physics, Particle Dynamics, and Nanotechnology to Transform Energy, Revolutionize Medicine, and Advance Environmental Sustainability."
- [117] Weinmann-Smith, Robert K., et al. "Use of a deuterium-deuterium neutron generator for the Add-A-Source waste matrix correction technique." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1072 (2025): 170128.
- [118] An, Baoyi, et al. "Scintillators for Neutron Detection and Imaging: Advances and Prospects." *Advanced Functional Materials* 35.19 (2025): 2422522
- [119] Wess, Ludger. *The Curious World of Bacteria*. Greystone Books Ltd, 2023
- [120] Lu, Yuxuan, Kai Wang, and Lin Hu. "Advancements in delivery systems for dietary polyphenols in enhancing radioprotection effects: challenges and opportunities." *npj Science of Food* 9.1 (2025): 51.
- [121] Vacca, Luigi. *Life Beyond Earth: The Fermi Paradox--Or Why We Are Still Waiting to Meet Aliens*. Springer Nature, 2025.
- [122] Xie, Wanjie, et al. "Interactions of melanin with electromagnetic radiation: From fundamentals to applications." *Chemical Reviews* 124.11 (2024): 7165-7213.
- [123] Khoza, Tshepiso, et al. "Alleviating Plant Density and Salinity Stress in *Moringa oleifera* Using Arbuscular Mycorrhizal Fungi: A Review." *Journal of Fungi* 11.4 (2025): 328.
- [124] Mukhopadhyay, Sourav, Swatilekha Sarkar, and Pinaki Sar. "Microbial Life Within the Deep, Hot Subsurface Biosphere and Its Implications in Astrobiology." *Mineral Transformation and Bioremediation by Geo-Microbes* (2025): 433-461.
- [125] Ojha, Shreya, and Uma Hapani. "Impact of Commercial Activities on the Marine World." *Radiation Status in the Marine World*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. 337-352
- [126] Angelin, A., et al. "Application of Biological Techniques in Mitigation of Radioactive Pollutant." *Radioactive Pollutant: Sources, Issues and Remediation*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. 373-391.
- [127] Venâncio, Cátia. "The Quirky Rot Fungi: Underexploited Potential for Soil Remediation and Rehabilitation." *Applied Sciences (2076-3417)* 15.3 (2025).
- [128] Akbar Aly, Abdul Basith, Balamurugan Shanmugaraj, and Sathishkumar Ramalingam. "Industrial applications of Phanerochaete chrysosporium lignin-degrading enzymes: current status, production challenges, and future directions." *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 41.5 (2025): 1-18.
- [129] Gou, Leyu, et al. "Mechanical Behavior and Formation Mechanisms of Hyphae-Based Lightweight Geomaterials." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 151.6 (2025): 04025034.

Références

- [130] Talal, Muhammad, et al. "A Critical Review: Unearthing the Hidden Players—The Role of Extremophilic Fungi in Forest Ecosystems." *Forests (19994907)* 16.5 (2025).
- [131] Pandey, Vinay Kumar, Sarvesh Rustagi, and Gurmeet Singh. "The Role of Mycoremediation in the Circular Economy." *Sustainable Remediation for Pollution and Climate Resilience*. Springer, Singapore, 2025. 421-441.
- [132] Cordero, Radames JB, et al. "Radiation protection and structural stability of fungal melanin polylactic acid biocomposites in low Earth orbit." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122.18 (2025): e2427118122.
- [133] Wolfensberger, Rebekka. *Clofazimine's Role in Modulating Macrophage Immune Response and the Exploration of Adoptive Myeloid Cell Transfer Therapy in Mice*. Diss. University of Zurich, 2025.
- [134] Birajdar, Kanchan M., et al. *Alternative And Complementary Treatment Modalities in Oral Lesions*. OrangeBooks Publication, 2025.
- [135] Klemanska, Anastasia. *A study of selected glucan-degrading enzymes from fungi, and their potential application in the valorisation of mushroom-production waste streams to yield products for animal and human health*. Diss. University of Limerick, 2024.
- [136] Mohany, Mohamed, et al. "Industrial Applications of Fungi." *Fungal Omics*. CRC Press 192-220.
- [137] Olumuyiwa, Emmanuel O., et al. "Morphological and molecular identification of fungi isolated from spoilt apples in Ota metropolis." *BMC microbiology* 25.1 (2025): 1-13.
- [138] Powsner, Rachel A., and Edward R. Powsner. *Essential nuclear medicine physics*. John Wiley & Sons, 2008.
- [139] Tran-Gia, Johannes, et al. "Rethinking Dosimetry: A European Perspective." *Journal of Nuclear Medicine* (2025).
- [140] Barrera, Stephani S. Martinez. *Elucidating the Roles of Septin Proteins in Thermotolerance and Cell Wall Integrity in Cryptococcus Neoformans*. Diss. Clemson University, 2024.
- [141] Piersigilli, Patrizia, et al. "A survey of electromagnetic techniques applied to cultural heritage conservation." *Applied Sciences* 15 (2025): 1-22.
- [142] Ferreira, Cristiano Dietrich, et al. "Ionizing Radiations." *Non-chemical Methods for Disinfestation of Stored Products*. CRC Press, 2025. 179-206.
- [143] Helal, Reham H., et al. "Electron beam irradiated composite based on poly (lactic acid)/aloe vera and its applications in biodegradable food packaging." *International Journal of Polymer Analysis and Characterization* (2025) : 1-17.
- [144] Xue, Mengyao, et al. "Aspergillus Mycotoxins: The Major Food Contaminants." *Advanced Science* (2025): 2412757.
- [145] Sawires, Sameh G., and Mahmoud Abd El-Wahab Soliman. "Impact of Irradiated and Non-Irradiated Propolis' Extract Against Biofilm, Pathogenic Bacteria, Dermatophyte Onychomycosis and Insect Pests of Stored Grain Tribolium castaneum (Herbst)." *Entomological News* 132.2 (2025): 103-125.
- [146] Jilani, Mwalimu Raphael, et al. "Microbial Nanotechnology in Medicine and Healthcare Industries." *Microbial Nanotechnology for Sustainable Future*. CRC Press 227-246.
- [147] Li, Sijia, et al. "Exploring the feasibility of low energy electron beam irradiation decontamination for textile cultural heritage." *npj Heritage Science* 13.1 (2025): 1-9.
- [148] Zhang, Xue-Qing, et al. "Spinulactones A–F: Bioactive Drimane-Type Sesquiterpenes from the Endophytic *Penicillium spinulosum* 9-1." *Journal of Natural Products* (2025).
- [149] Zhang, Shuncun, et al. "The Cytotoxic Activity of Secondary Metabolites from Marine-Derived *Penicillium* spp.: A Review (2018–2024)." *Marine Drugs* 23.5 (2025) : 197.
- [150] Marković, Srdjan Z., and Miloš D. Mojović. "Biological Effects of Ionizing Radiation." *Hospital Pharmacology : International Multidisciplinary Journal* 12.1 (2025).
- [151] Horikiri, Shigetoshi, et al. "Gamma-irradiated *Aspergillus* conidia show a growth curve with a reproductive death phase." *Journal of Radiation Research* 65.1 (2024): 28-35.
- [152] Kataoka, Noriaki, et al. "Radiation sensitivity of *Aspergillus Niger* of low-energy X-rays and Caesium-137 gamma rays." *Radiation Physics and Chemistry* 218 (2024): 111586.
- [153] Eltawab, Abd, et al. "Evaluation and Enhancement of Bioactive Compounds of *Aspergillus Tereus* Endophyte Isolated from Neem by Gamma Irradiation." *Egyptian Journal of Chemistry* 67.2 (2024): 339-355.
- [154] Tegariyanto, M. R., H. S. Titah, and H. Pratikno. "Biodegradation of polyethylene terephthalate (PET) plastics using a combination of *Aspergillus Niger* and *Trichoderma harzianum*." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 1414. No. 1. IOP Publishing, 2024.
- [155] Fischer, Florian Carlo, Dirk Schulze-Makuch, and Jacob Heinz. "Microbial preference for chlorate over perchlorate under simulated shallow subsurface Mars-like conditions." *Scientific Reports* 14.1 (2024): 11537.

Références

- [156] Wibowo, Yudha Gusti, et al. "Functionalized magnetite-biochar with live and dead bacteria for adsorption-biosorption of highly toxic metals: Cd, Hg, and Pb." *Next Materials* 6 (2025): 100487.
- [157] Soleimani, Farshid, et al. "Bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons from leachates of waterpipe tobacco wastes on *Peronia peronii* species from the Persian Gulf region." *Scientific Reports* 15.1 (2025): 9227.
- [158] El Gendy, Salsabeel N., et al. "Biotransformation of quercetin by *Bacillus subtilis* and anticancer activity evaluation: in vitro and in Silico." *AMB Express* 15.1 (2025): 58.
- [159] Langunu, Serge. "Evaluation de l'efficacité de la phytoremédiation de sols pollués en métaux traces dans l'arc cuprifère Katangais (République Démocratique du Congo)." (2025).
- [160] Vikström, Amanda, et al. "Volatilisation of elements during clinker formation in a carbon dioxide atmosphere." *Advances in Cement Research* 37.5 (2025): 289-300.
- [161] Derrick, Asare, et al. "Understanding the detrimental effects of heavy metal pollution in shrimp farming and treatment methods—a review." *Annals of Animal Science* 25.1 (2025): 35-56.
- [162] Chen, Hejia, et al. "Copper homeostasis and its Impact on innate immunity in crustaceans." *Reviews in Aquaculture* 17.1 (2025): e12963.
- [163] Idim, Veronica David Idim, et al. "Effects of the Leachates of Essential and Non-Essential Inorganic Materials from Mined Clay Deposits and Landfills on the Environment: A Review." *ChemClass Journal* 9.1 (2025) : 484-494.
- [164] Wang, Lei, et al. "The Tartary Buckwheat FtMYB46-FtNRAMP3 Module Enhances Plant Lead and Cadmium Tolerance." *Plant, Cell & Environment* (2025).
- [165] Iseli, Angela, Haidoo Kwen, and Shyamala Rajagopalan. "Nanomaterials for environmental remediation." *Nanoscale Mater. Chem. (2nd Ed.) FIELD Full Journal Title: Nanoscale Materials in Chemistry* (2009): 649-679.
- [166] Tripathi, Sachin, et al. *Potential arsenic–mercury–lead–chromium co-contamination in the mid-Gangetic plains, India: Hydrogeochemical processes and health perspectives*. No. EGU25-14046. Copernicus Meetings, 2025.
- [167] Virah-Sawmy, Dan, and Bjorn Stormberg. "Socio-economic and environmental impacts of renewable energy deployments: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 207 (2025): 114956.
- [168] Dahlbom, Sixten. "Decontamination of PFAS-Contaminated Firefighting Equipment-A Review." *Journal of Hazardous Materials* (2025): 138983.
- [169] De Almeida Martins, Bruna, and Jacqueline Aparecida Takahashi. "Overview of bioremediation as a method for metal-contaminated wastewater treatment." *Environmental Science and Pollution Research* (2025): 1-25.
- [170] Karmakar, Varnita, et al. "BIOREMEDIATION AND DETOXIFICATION STRATEGIES USING MICROORGANISMS: MOLECULAR ASPECT TO COMBAT HEAVY METAL CONTAMINATION." *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)* 24.3 (2025).
- [171] Raval, Bhargav, et al. "Microbes and Nanoconjugate-Assisted Removal of Heavy Metals from Water Resources." *Nano-Bioremediation for Wastewater Treatment* (2025) : 107-145.
- [172] Bilak, Rida. *Validation de la méthode d'analyse du potassium K₂O par spectroscopie d'absorption* atomique dans les phosphates (OCP)*. Thèse de Master, juin 2017. Dispositif expérimental d'absorption atomique (fig. "dispositif-experimental-d' absorption-atomique"), ResearchGate https://www.researchgate.net/figure/dispositif-experimental-dabsorption-atomique_fig15_329990910
- [173] Debastiani, Rafaela, et al. "Elemental Analysis of Coffee with Ion Beam Analytical Techniques." *Foods* 14.4 (2025): 585.
- [174] Khan, Noor Zamin, et al. "Tunable Single-Phase White Light Emission from Complex Perovskite Sr₃CaNb₂O₉: Dy³⁺/Eu³⁺ Phosphors." *Advanced Optical Materials* 13.1 (2025) : 2401938.
- [175] Sun, Haoran, et al. "Selective control of surface characteristics of magnesite and quartz by a novel silicophilic collector stearylamine acetate." *Applied Surface Science* 680 (2025) : 161288.
- [176] Chen, Xiangzhen, et al. "Portable fluorescent film and gel microspheres for sensitive multi-color detection and efficient adsorption of tetracycline." *Separation and Purification Technology* 352 (2025): 128258.
- [177] Ishikawa, Kazuya, et al. "Sulphur-Acquisition Pathways for Cysteine Synthesis Confer a Fitness Advantage to Bacteria in Plant Extracts." *Environmental Microbiology* 27.6 (2025) : e70126
- [178] Egbueri, Johnbosco C., et al. "Radionuclides as Environmental Contaminants of Concern: Threats to Public Health Through Soil and Groundwater." *Sustainable Groundwater and Environment: Challenges and Solutions*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. 333-364.
- [179] Jakhu, Rajan, et al. "Radionuclide content in soil from agricultural lands in the Russian Federation." *The European Physical Journal Special Topics* (2025): 1-7.

Références

- [180] Barik, Debashis, et al. "Environmental Pollutants Such as Endocrine Disruptors/Pesticides/Reactive Dyes and Inorganic Toxic Compounds Metals, Radionuclides, and Metalloids and Their Impact on the Ecosystem." *Biotechnology for Environmental Sustainability*. Singapore : Springer Nature Singapore, 2025. 391-442.
- [181] Kuligowski, Ksawery, et al. "Conversion of Kitchen Waste into Sustainable Fertilizers: Comparative Effectiveness of Biological, Microbial, and Thermal Treatments in a Ryegrass Growth Trial." *Applied Sciences* 15.10 (2025) : 5281.
- [182] Niyoteka, Stéphane. *Radiomics and Artificial Intelligence for personalized treatment of HPV-induced cancers*. Diss. Université Paris-Saclay, 2023.
- [183] Park, Chansun, et al. "Gamma-ray detection using Cs₃Cu₂I₅ perovskite scintillator crystals grown by fast inverse temperature crystallization." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1076 (2025): 170475.
- [184] Koochi, Siamak Hooshmand, and Ahmad Esmaili Torshabi. "A Feasibility Study on Nano-Particle Properties for Signal Generation at NaI (Tl) Scintillation Detectors." *Frontiers in Biomedical Technologies* 12.1 (2025) : 66-74.
- [185] Donner, Jonny. "Comparative study of gamma-ray detectors: NaI (Tl), germanium and LaBr₃." (2025).

Annex 1 : Détail du calcul du nombre de spores à l'aide de la cellule de Malassez

1) Exposition gamma :

- Pour le champignon penicillium s p (TCS 34)

1_ Témoin :

14	4	3	24	10
10	8	29	5	4
13	6	17	4	12
16	6	11	5	15
27	24	27	16	17

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a \cdot V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9

$$n = 14 + 8 + 17 + 4 + 5 + 17 + 10 + 5 + 6 + 26 = 109$$

$$V = 0.01 \text{ mm}^3 = 0.01 \mu\text{l} = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ ml}$$

$$Fd = 1000$$

$$N = \frac{109}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 1.21 \cdot 10^9 \text{ (cellules/ml)}$$

2_ TCS 34 (0.5KGy):

17	15	16	17	9
18	13	15	20	28
12	6	2	6	32
9	15	19	25	8
8	13	17	16	30

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a \cdot V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9

$$n = 139$$

$$V = 0.01 \text{ mm}^3 = 0.01 \mu\text{l} = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ ml}$$

$$Fd = 1000$$

$$N = \frac{139}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 1.54 \cdot 10^9 \text{ (cellules/ml)}$$

3_TCS 34 (1KGy):

7	3	27	8	5
1	3	4	4	5
11	4	5	4	8
5	6	6	3	6
10	8	7	1	6

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a \cdot V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9

$$n = 49$$

$$V = 0.01 \text{ mm}^3 = 0.01 \mu\text{l} = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ ml}$$

$$Fd = 1000$$

$$N = \frac{49}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 5.44 \cdot 10^{10} \text{ (cellules/ml)}$$

4_TCS 34 (2KGy):

64	78	89	70	93
68	64	94	91	47
43	40	42	19	35
17	18	25	30	30
11	45	14	30	42

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a \cdot V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9

$$n = 455$$

$$V = 0.01 \text{ mm}^3 = 0.01 \mu\text{l} = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ ml}$$

$$Fd = 1000$$

$$N = \frac{455}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 5.04 \cdot 10^9 \text{ (cellules/ml)}$$

5_TCS 34 (5KGy):

4	9	13	1	24
4	12	5	14	3
2	7	15	20	3
8	15	4	9	4
8	11	4	14	42

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a.V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9

$$n = 105$$

$$V = 0.01 \text{ mm}^3 = 0.01 \mu\text{l} = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ ml}$$

$$Fd = 1000$$

$$N = \frac{105}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 1.17 \cdot 10^9 \text{ (cellules/ml)}$$

Pour le champignon *Aspergillus Niger* (TBS 33)

1_ Témoin :

1	3	8	2	11
3	1	9	4	3
2	0	10	6	4
8	5	1	5	2
0	2	13	4	4

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a.V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9

$$n = 41$$

$$V = 0.01 \text{ mm}^3 = 0.01 \mu\text{l} = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ ml}$$

$$Fd = 1000$$

$$N = \frac{41}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 4.55 \cdot 10^{10} \text{ (cellules/ml)}$$

2_TBS 33 (0.5KGy):

24	13	31	19	23
22	22	26	36	18
28	29	17	31	30
17	19	31	32	36
12	33	25	55	17

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a \cdot V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9

$$n = 202$$

$$V = 0.01 \text{ mm}^3 = 0.01 \mu\text{l} = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ ml}$$

$$Fd = 1000$$

$$N = \frac{202}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 2.24 \cdot 10^9 \text{ (cellules/ml)}$$

3_TBS 33 (1KGy):

57	20	27	39	43
41	42	35	24	47
48	41	55	71	43
44	50	37	55	22
42	70	68	53	25

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a.V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9

$$n = 393$$

$$V = 0.01 \text{mm}^3 = 0.01 \mu\text{l} = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ml}$$

$$Fd = 1000$$

$$N = \frac{393}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 5.44 \cdot 10^9 \text{ (cellules/ml)}$$

4_TBS 33 (2KGy):

40	20	28	25	23
17	21	24	18	27
30	34	21	21	15
19	14	22	19	23
21	28	25	23	21

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a.V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9

$$n = 198$$

$$V = 0.01 \text{mm}^3 = 0.01 \mu\text{l} = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ml}$$

$$Fd = 1000$$

$$N = \frac{198}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 2.2 \cdot 10^9 \text{ (cellules/ml)}$$

5_TBS 33 (5KGy):

9	11	8	11	3
8	11	12	7	25
5	10	7	5	14
18	40	21	5	14
10	9	18	6	13

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a \cdot V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9 n= =143

$$V = 0.01 \text{ mm}^3 = 0.01 \mu\text{l} = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ ml}$$

$$Fd = 1000$$

$$N = \frac{143}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 1.59 \cdot 10^9 \text{ (cellules/ml)}$$

2) Neutron :

Pour le champignon *Aspergillus Niger* (TBS 33)

Pendant 3 jour :

Témoin :

2	16	8	2	3
0	2	1	2	4
3	4	4	1	5
14	2	2	0	6
1	2	1	5	5

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a \cdot V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9

$$n = 21$$

$$V = 0.01 \text{ mm}^3 = 0.01 \mu\text{l} = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ ml}$$

$$Fd = 1000$$

$$N = \frac{21}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 2.33 \cdot 10^8 \text{ (cellules/ml)}$$

Pendant 3 jour :

72	40	69	36	40
26	24	20	26	8
13	23	18	12	4
5	3	3	2	2
5	14	25	2	4

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a \cdot V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9

$$n = 194$$

$$V = 0.01 \text{ mm}^3 = 0.01 \mu\text{l} = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ ml}$$

$$Fd = 1000$$

$$N = \frac{194}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 2.15 \cdot 10^9 \text{ (cellules/ml)}$$

Pendant 6 jour :

Temoin :

12	18	14	11	7
5	3	4	7	6
3	2	3	7	2
1	3	1	5	4
1	3	3	7	1

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a \cdot V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9 n=42

$$V = 0.01 \text{ mm}^3 = 0.01 \mu\text{l} = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ ml}$$

$$Fd = 1000$$

$$N = \frac{42}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 4.67 \cdot 10^8 \text{ (cellules/ml)}$$

Pendant 6 jour :

4	11	8	4	10
5	4	10	12	7
1	4	15	0	7
10	13	40	12	14
12	9	13	15	3

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a.V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9

$$n=85$$

$$V=0.01\text{mm}^3=0.01\mu\text{l}= 0.01 \cdot 10^{-3}\text{ml}$$

$$Fd= 1000$$

$$N = \frac{85}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 9.4 \cdot 10^8 \text{ (cellules/ml)}$$

Pendant 10 jour :

Témoin :

3	6	3	2	1
1	6	2	0	2
0	1	1	8	4
7	5	5	1	3
1	1	2	3	4

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a.V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9

$$n=22$$

$$V=0.01\text{mm}^3=0.01\mu\text{l}= 0.01 \cdot 10^{-3}\text{ml}$$

$$Fd= 1000$$

$$N = \frac{22}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 2.4 \cdot 10^8 \text{ (cellules/ml)}$$

Pendant 10jr :

3	4	15	10	3
3	11	3	6	6
6	3	0	8	8
3	8	3	3	1
3	10	14	7	12

Calcule le nombre des cellules par unité de volume :

$$N = \frac{n}{a \cdot V} \cdot Fd$$

le nombre des cellules comptée (a) c'est le nombre des cases en diagonale dans ce carrée et Le nombre des cellules comptée (n) c'est le nombre des cellules en diagonale.

On a a=9 n=49

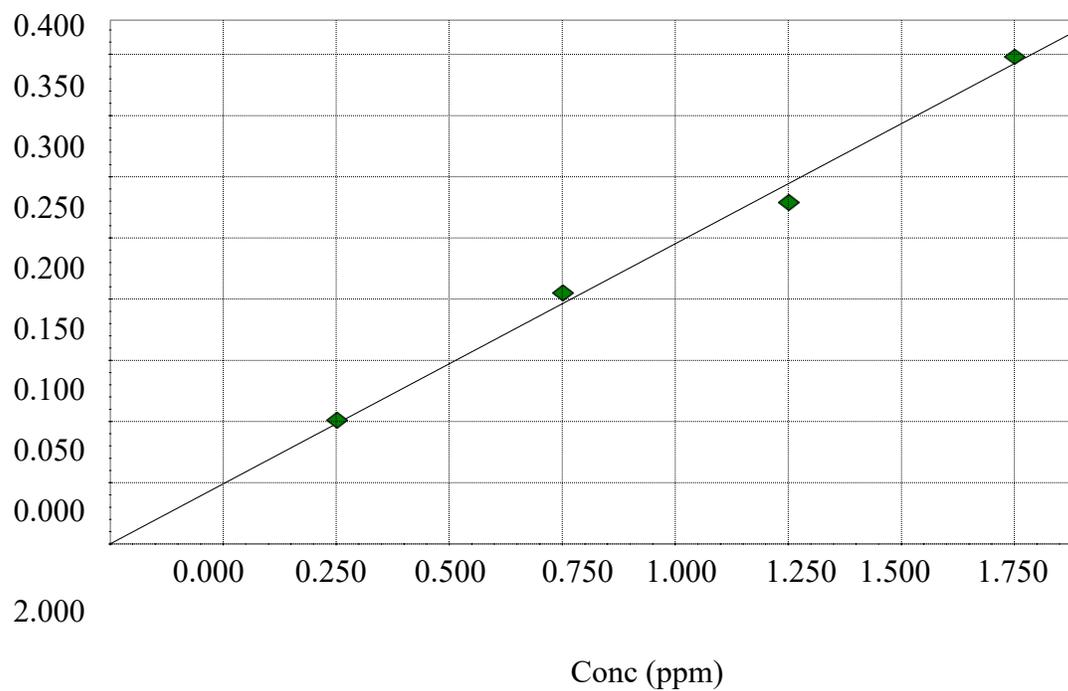
$$V = 0.01 \text{ mm}^3 = 0.01 \mu\text{l} = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ ml}$$

$$Fd = 1000$$

$$N = \frac{49}{9 \cdot 0.01 \cdot 10^{-3}} \cdot 1000 = 5.5 \cdot 10^8 \text{ (cellules/ml)}$$

Annex 2 : étalonnage des métaux lourds pour la SAA

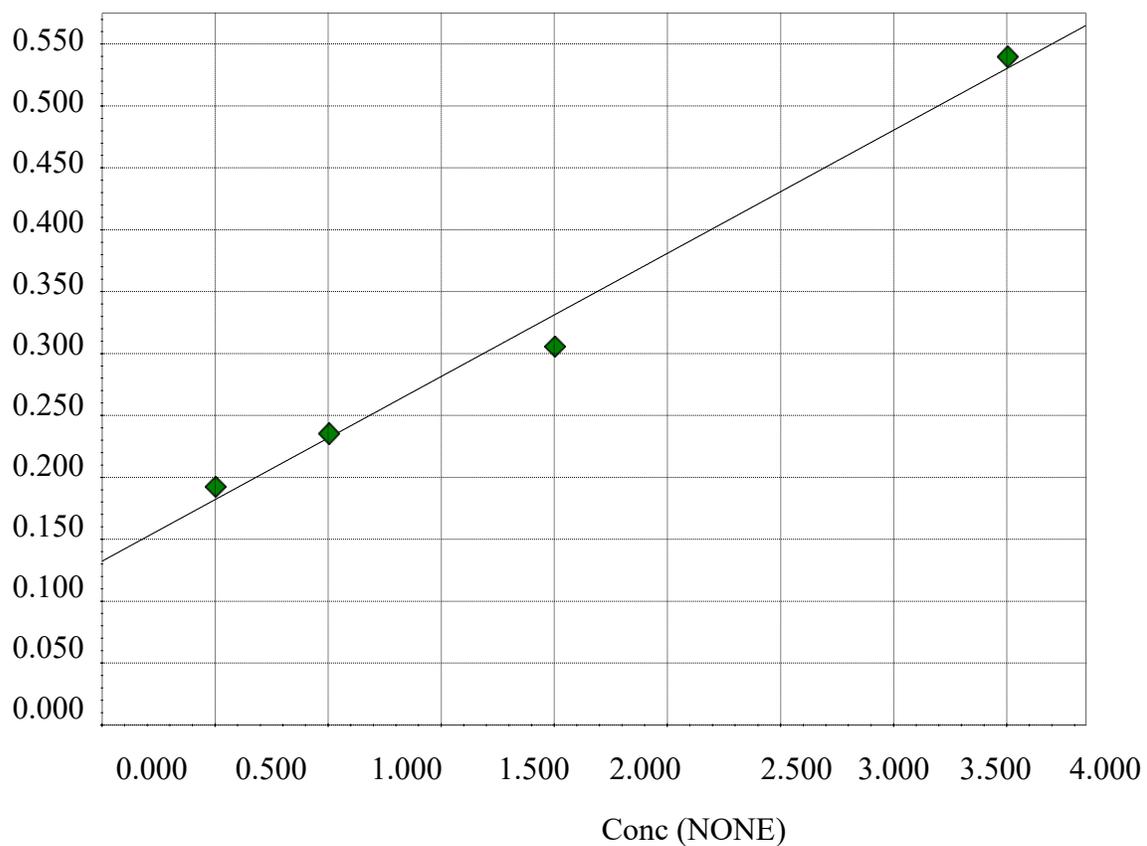
1) pour le CdCl₂



$$\text{Abs} = 0.19623 \text{Conc} + 0.00000 \quad r = 0.9963$$

CONC (ppm)	ABS (ppm)
0.5000	0.1013
1.0000	0.2056
1.5000	0.2791
2.0000	0.3984

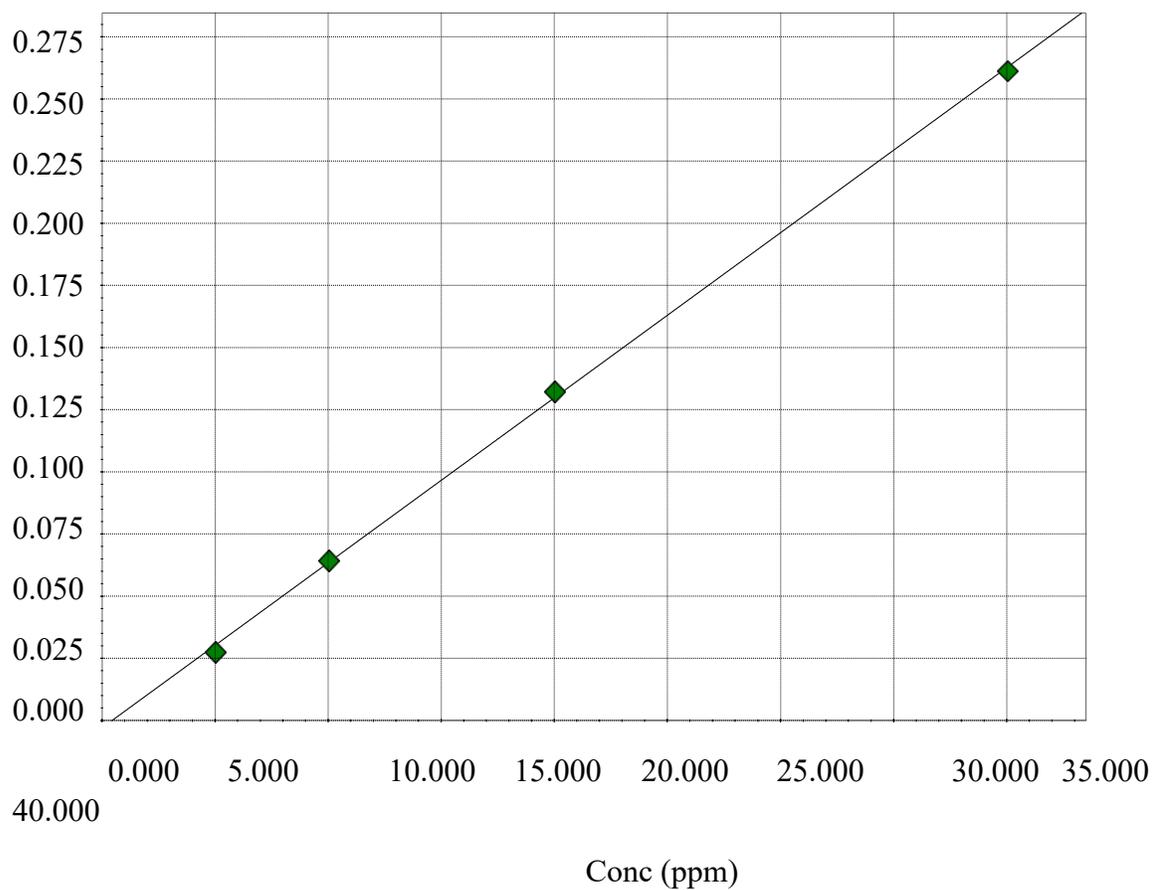
2) Pour CuSo₄ :



$$\text{Abs} = 0.099485 \text{Conc} + 0.13237 \quad r = 0.9940$$

<u>CONC</u>	<u>ABS</u>
0.5000	0.1928
1.0000	0.2360
2.0000	0.3064
4.0000	0.5404

3) Pour $Pb(NO_3)_2$:



$$\text{Abs} = 0.0066405 \text{Conc} - 0.0030348 \quad r = 0.9997$$

<u>CONC</u>	<u>ABS</u>
5.0000	0.0277
10.0000	0.0645
20.0000	0.1324
40.0000	0.2613

Annex 3 : Les droite de calibration

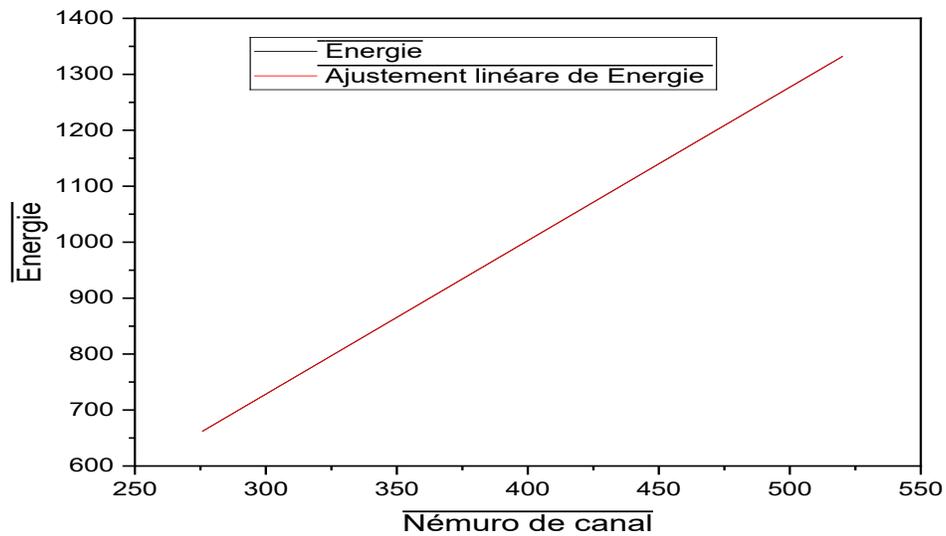
1. Avant le traitement :

Témoïn 1 a t=0 :

$$E = a * C + b$$

$$a = 2.74301 \pm 0.00237$$

$$b = -94.52444 \pm 1.02269$$

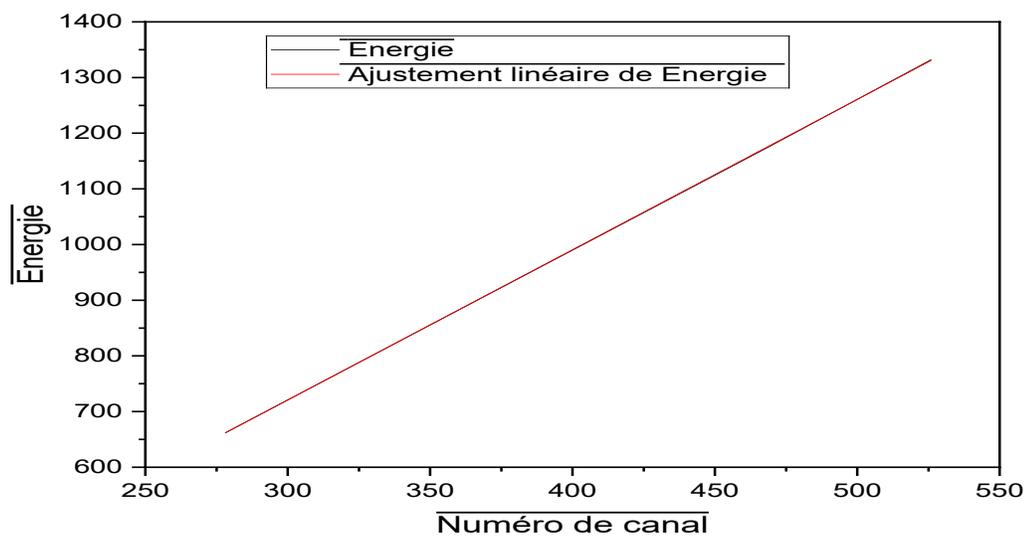


Témoïn 2 :

$$E = a * C + b$$

$$a = 2.6999 \pm 0.00951$$

$$b = -89.2445 \pm 4.15802$$



TBS 33 (2 semaine)

$$E = a \cdot C + b$$

$$a = 2.77757 \pm 0.04625$$

$$b = -95.16301 \pm 19.7428$$

