



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - B.B.A.

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الارض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم البيولوجية

Département des Sciences Biologiques



Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Toxicologie

Intitulé

**Etude de l'impact toxicologique des nanoparticules
métalliques sur la qualité du blé**

Présenté par : BOUKHATALA Amel

BOULAOUAD Sara

Soutenu le: 15 /09 /2021

Devant le jury :

Président :	M ^r DIAFAT Abdelouahab	M.C.A	(Univ. Bordj Bou Arreridj)
Encadrant :	M ^{me} MOUMENI Ouissem	M.C.B	(Univ. Bordj Bou Arreridj)
Examineur :	M ^{me} BOULKROUNE Hasna	M.C.B	(Univ. Bordj Bou Arreridj)

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

*Un très grand merci à notre **dieu ALLAH** qui est toujours présent avec nous dans les moments faciles et difficiles de la vie*

Par ces quelques lignes, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de ce mémoire, en espérant n'avoir oublié personne.

*Nous tenons avant tout à remercier du fond du cœur, notre encadrant: **M^{me} MOUMENI Ouisse**m, pour avoir accepté de diriger ce travail et avoir participé à son élaboration avec patience et disponibilité. Son dévouement au travail, sa modestie et sa gentillesse imposent le respect.*

Nous adressons nos plus vifs remerciements aux membres du jury ;

*Nous tenons à remercier **M^r DIAFAT Abdelouahab** pour avoir accepté de présider et évaluer ce modeste travail.*

*Nous remercions vivement **M^{me} BOULKROUNE Hasna** pour avoir accepté d'examiner notre travail.*

Nous remercie vivement tous les enseignants de l'université de

Bordj Bou Arréridj.

Un grand merci à tous.

Dédicaces

J E DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL

A ma très chère mère

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur

A de mon Père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation.

*Aux personnes que j'ai bien aimé leur présence dans ce jour, et qui m'ont soutenu tout au long de ce projet, ma sœur **Dounia** et mon ami adorable **Sarah***

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés

AMEL

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quelque soit les termes utilisés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

*A l'homme, a qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect: mon cher père **Brahim***

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère **Zouina***

A ma chère sœur, et mes frères, qui n'ont pas cessé de me Conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes Etudes.

Que dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur

A tous les amis que j'ai connu

Merci pour leur amour et leurs encouragements.

*Sans oublier mon binôme **Amel** et pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de la réalisation de ce projet*

SARA

Résumé

L'objectif de notre travail est d'étudier l'effet de différentes concentrations des nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre sur quelques paramètres germinatifs, morphométriques et physiologiques des graines de blé dur (*Triticum durum*).

Dans un premier temps, les résultats obtenus révèlent que le taux et la cinétique de germination des graines de blé dur tendent à diminuer de manière dose-dépendante et inversement proportionnelle aux concentrations croissantes des nanoparticules. La toxicité s'est manifestée sur le plan morphométrique par une diminution de la longueur moyenne des racines et des coléoptiles des graines traitées par rapport à celles témoins.

D'autre part, le traitement par les nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre a induit une augmentation des teneurs en pigments photosynthétiques (chlorophylles a, b, a+b et caroténoïdes), ce qui indique une stimulation de la photosynthèse.

D'après l'ensemble de nos expériences, il est évident que les nanoparticules d'oxydes de cuivre sont plus toxiques que celles du fer.

Mots clés : le blé (*Triticum durum*), toxicité, nanoparticule, cuivre, fer, germination.

Abstract

The objective of our work is to study the effect of different concentrations of iron and copper oxide nanoparticles on some germinal, morphometric and physiological parameters of durum wheat (*Triticum durum*) seeds.

First, the results obtained reveal that the rate and the germination kinetics of durum wheat seeds tend to decrease in a dose-dependent manner and inversely proportional to the increasing concentrations of the nanoparticles. The toxicity manifested morphometric ally as a decrease in the average length of roots and coleoptiles of treated seeds compared to controls.

On the other hand, treatment with iron and copper oxide nanoparticles induced an increase in the content of photosynthetic pigments (chlorophylls a, b, a + b and carotenoids), which indicates stimulation of photosynthesis.

From all of our experiments, it is evident that copper oxide nanoparticles are more toxic than iron nanoparticle.

Key words: wheat (*Triticum durum*), toxicity, nanoparticle, copper, iron, germination.

الملخص

الهدف من عملنا هو دراسة تأثير تركيزات مختلفة من جزيئات الحديد وأكسيد النحاس النانوية على بعض المتغيرات الجرثومية والمورفومترية والفيزيولوجية لبذور القمح الصلب (*Triticum durum*).

أولاً ، كشفت النتائج المتحصل عليها أن معدل وحركية إنبات بذور القمح القاسي تميل إلى الانخفاض بطريقة تعتمد على الجرعة وتتناسب عكسياً مع زيادة تركيزات الجسيمات النانوية. تجلت السمية بشكل شكلي في شكل انخفاض في متوسط طول الجذور والجذور الخيطية للبذور المعالجة مقارنة بالضوابط.

من ناحية أخرى ، أدى العلاج بجسيمات نانوية من أكسيد الحديد والنحاس إلى زيادة محتوى أصباغ التمثيل الضوئي (الكلوروفيل أ ، ب ، أ + ب والكاروتينات) ، مما يشير إلى تحفيز التمثيل الضوئي .

من جميع تجاربنا ، من الواضح أن جزيئات أكسيد النحاس النانوية أكثر سمية من جسيمات الحديد النانوية .

الكلمات المفتاحية: القمح ، السمية ، الجسيمات النانوية ، النحاس ، الحديد ، الإنبات الكلمات المفتاحية.

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumés

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction	1
Matériel et méthodes	4
1. Présentation du matériel biologique	4
1.1. Description de la plante de blé dur	5
1.2. Composition biochimique et valeurs nutritives du blé dur	6
1.3. Origine géographique du blé dur	7
1.4. Cycle de vie du blé dur	7
2. Présentation du matériel chimique	8
3. Protocole expérimental	8
3.1. Mise en suspension des NPs	8
3.2. Préparation des graines de blé	8
3.3. Conduite de l'essai et traitements	9
4. Paramètres étudiés Paramètres étudiés	10
4.1. Mesure des paramètres germinatifs	10
4.1.1. Taux de germination	10
4.1.2. Cinétique de germination	10
4.2.1. Longueur moyenne des racines	10
4.2.2. Longueur moyenne des coléoptiles	11
4.3. Mesure des paramètres physiologiques	11
4.3.1. Dosage des chlorophylles et des pigments caroténoïdes	11
5. Etude statistique	12
Résultats	13
1. Effet des nanoparticules d'oxydes de fer (Fe ₂ O ₃) et de cuivre (CuO) sur les paramètres germinatifs	13

Table des matières

1.1. Effet des nanoparticules d'oxydes de fer (Fe ₂ O ₃) et de cuivre (CuO) sur le taux de germination après 8 jours de traitement	13
1.2. Effet des nanoparticules d'oxydes fer (Fe ₂ O ₃) et de cuivre (CuO) sur la cinétique de germination	14
2. Effet des nanoparticules d'oxydes de fer (Fe ₂ O ₃) et de cuivre (CuO) sur les paramètres morphométriques	16
2.1. Effet des nanoparticules d'oxydes de fer (Fe ₂ O ₃) et de cuivre (CuO) sur la longueur moyenne des racines	16
2.2. Effet des nanoparticules d'oxydes de fer (Fe ₂ O ₃) et de cuivre (CuO) sur la longueur moyenne des coléoptiles	17
3. Effet des nanoparticules d'oxydes de fer (Fe ₂ O ₃) et de cuivre (CuO) sur la synthèse des pigments photosynthétiques	18
Discussion	20
Conclusion et perspectives	25
Références bibliographiques	26

Liste des abréviations

- APX** : Ascorbate Peroxydase
- CaCO₃** : Bicarbonate de Calcium
- CAT** : Catalase
- CuO** : Oxyde de cuivre
- ERO** : Espèces Réactives de l'Oxygène
- Fe₂O₃** : Oxyde de fer
- GPX** : Gaïacol Peroxydase
- GSH** : Glutathion
- GST** : Glutathion-S-Transférase
- NI** : Nombre total de graines germées
- NPs** : Nanoparticules
- NT** : Nombre total des graines
- OAIC** : Office Algérien Inter Professionnel des Céréales
- PF** : Poids frais
- Red-Oxe** : Réduction-Oxydation
- TG** : Taux de germination
- TiO₂** : Dioxyde de titane
- ZnO** : Oxyde de zinc

Liste des abréviations

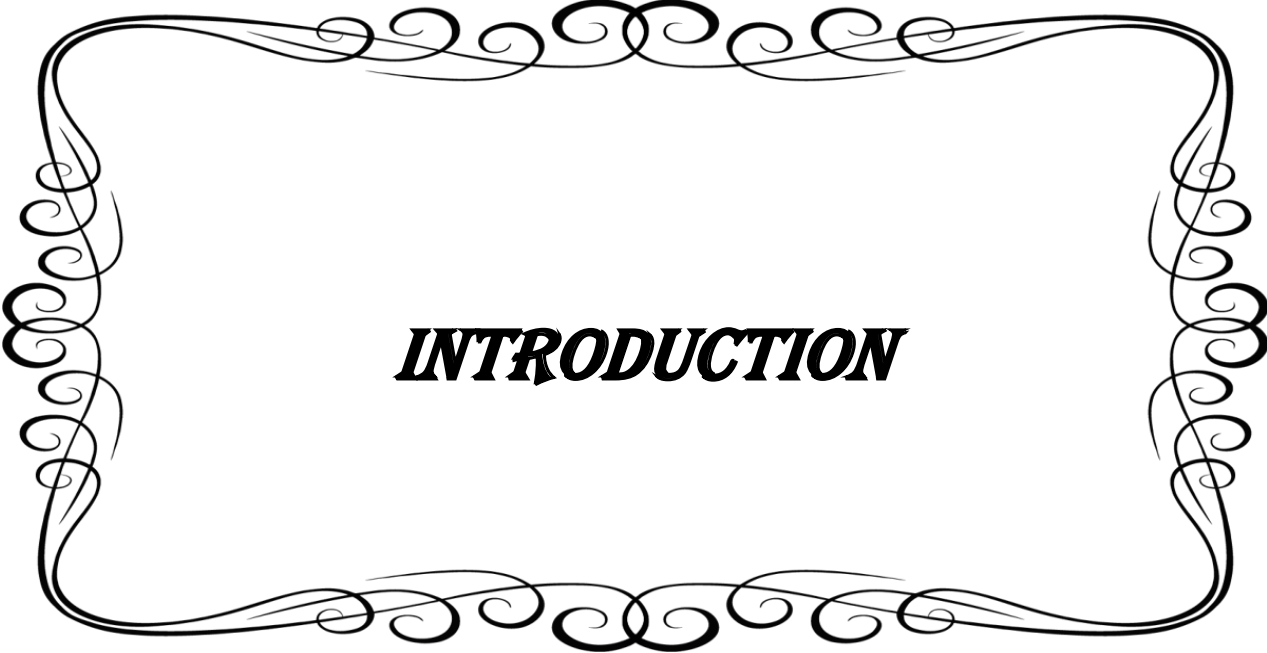
Liste des tableaux

N°	Titres	Pages
I	Les caractéristiques agronomiques de la variété « Siméto »	4
II	Classification du blé dur	5
III	Composition biochimique du tissu d'un grain de blé dur	6
IV	Cycle de développement du blé	7
V	Effet des nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre sur la teneur en chlorophylle a, b, a+b et en caroténoïdes	18

Liste des figures

N°	Titres	Pages
1	La variété « Siméto » de blé dur.	4
2	Poudres de NP s de Fe ₂ O ₃ (A) et CuO (B)	8
3	Dispositif expérimental de l'essai avant et après l'arrosage (culture en boîte de pétri)	9
4	Effet des nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre sur le taux de germination des graines de blé dur après 8 jours d'exposition	13
5	Effet des nanoparticules d'oxydes de fer (A) et de cuivre (B) sur la cinétique de germination des graines de blé dur	15
6	Longueur moyenne des racines (en cm) des graines de blé dur témoins et traitées par les nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre après 8 jours d'exposition	16
7	Longueur moyenne des coléoptiles (en cm) de graines de blé dur témoins et traitées par les nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre après 8 jours d'exposition.	18

Liste des figures



Le développement des nanomatériaux et leur emploi à l'échelle industrielle sont en plein essor depuis une dizaine d'années. En effet, les propriétés physico-chimiques de ces matériaux permettent leur utilisation pour des applications variées, allant de la fabrication de produits alimentaires ou cosmétiques, au développement d'outils pour l'électronique ou encore les sciences biomédicales (**Triboulet , 2013**) .

A ce jour, les nanoparticules sont étudiées à travers le monde dans des centaines de laboratoires et d'entreprises pour mettre à profit de plus en plus encore leurs propriétés physico-chimiques, les caractéristiques de leur échelle nanométrique et développer ainsi de nouvelles applications. La mise sur la marche de produits contenant des nanomatériaux est ainsi passée de 54 en 2005 à 1317 en 2011 (**Daniel, 2010**). Parallèlement, des études de plus en plus nombreuses sont entreprises afin de mieux comprendre les risques liés aux nanoparticules sur l'environnement. Celles-ci visent notamment à évaluer la toxicité de nanoparticules de natures variées sur différents modèles in vivo ou in vitro (**Triboulet, 2013**).

Il a été démontré que les plantes jouent un rôle important dans le comportement et le transport des nanoparticules dans l'environnement à travers leur pénétration et leur bioaccumulation dans les tissus végétaux (**Monica et Cremonini, 2009**). Cependant, les connaissances actuelles concernant leurs mécanismes exacts d'interactions avec les constituants cellulaires s'avèrent relativement limitées. De même, les travaux observant l'effet des nanoparticules sur les paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques des systèmes végétaux sont pratiquement rares (**Homaee et Ehsanpour, 2015 ; Rahmani et al., 2016**).

Parmi ces études récentes nous citons ceux de (**Yang et al., 2005**) ; qui ont étudié l'impact des nanoparticules d' Al_2O_3 sur plusieurs espèces végétales (maïs, concombre, soja, le chou et la carotte...). D'autre part, (**Lin et al., 2007**) ont étudié l'impact des nanoparticules de ZnO sur la germination des graines de radis (**Khodakovskaya et al., 2009**) ont également déterminé l'impact des nanotubes de carbone sur les graines de tomate (*Lycopersicon esculentum*), colza, ray-grass, de la laitue et du concombre. Dans le cadre de l'évaluation des sols pollués, les effets génotoxiques et systèmes de détoxification chez la fève (*Vicia faba*) ont été aussi déterminé par (**Foltete, 2010**). D'autres travaux ont étudié l'effet de nanoparticules de ZnO, sur l'ail (*Allium sativum*) (**Shaymurat et al., 2011**).

Ces études rapportant l'impact des nanoparticules sur différentes espèces végétales mettent en évidence des effets bénéfiques et d'autres néfastes (**Larue, 2011**). Ces effets dépendent ainsi de la concentration des nanoparticules. A faibles concentrations, les nanoparticules semblent ne pas avoir d'effets négatifs sur les plantes, par contre, des concentrations plus élevées peuvent causer des effets néfastes (**Thuesombat et al., 2014**). Très récemment (**Boonyanitipong et al., 2011**) ont rapporté dans leurs études portant sur les NPs de TiO₂ et ZnO, que les nanoparticules de ZnO affectent la croissance de la plante en inhibant la longueur des racines et en réduisant leur nombre. Cependant, les nanoparticules de TiO₂ n'ont pas un tel effet inhibiteur sur la longueur des racines. En effet, la variabilité des effets des nanoparticules sur les plantes dépend non seulement de leur type (**Feng et al., 2013**) et de leurs propriétés (**Ma et al., 2010 ; Dietz et Herth, 2011 ; Ghafariyan et al., 2013**), mais aussi des espèces végétales (**Zhu et al., (2008)**) et de leur stade de développement, du temps, des doses et des méthodes d'exposition (**Ma et al., 2013**).

Les céréales cultivées depuis des milliers d'années, constituent la base de notre alimentation et jouent la carte de la diversité. De l'Europe à l'Asie, en passant par l'Afrique et l'Amérique, les hommes du monde entier en ont développé de nombreuses variétés. Elles seront sans doute amenées à jouer un rôle fondamental face aux défis démographiques et environnementaux du siècle (**Nedjah, 2015**).

En Algérie, les produits céréaliers occupent une place stratégique dans les systèmes alimentaires et dans l'économie nationale. Cette caractéristique est perçue d'une manière claire à travers toutes les phases de la filière (**Djermoun, 2009**). Le potentiel de productivité des cultures pourrait être apprécié à travers leur capacité photosynthétique. Aussi, le développement et la formation de la surface foliaire dépendent du potentiel photosynthétique. Ce paramètre essentiel est en rapport avec les rendements biologiques et économiques des céréales. Les céréales constituent environ 30% des sources énergétiques alimentaires dans les pays développés, contre plus de 50% dans les pays en voie de développement, atteignant parfois 90% dans certains pays d'Afrique (**Aissa et Mhiri, 2000**).

Les blés constituent la première ressource alimentaire de l'humanité, et la principale source de protéines. Ils fournissent également une ressource privilégiée pour l'alimentation animale et de multiples applications industrielles (**Bonjean et Picard, 1990**). Le blé dur est la première céréale cultivée dans le pays. Elle occupe annuellement plus d'un million d'hectares. Cependant, la production nationale en blé dur est encore faible, elle ne couvre que 20 à 25 %

des besoins du pays, le reste étant importé. La cause principale de la faiblesse de la production du blé dur en Algérie est le faible niveau de productivité (rendement) obtenu, soit 9 à 11 quintaux/hectare. Cette faible productivité est elle-même due à des contraintes abiotiques (pluviométrie surtout), biotiques (adventices surtout) et humaines (itinéraires techniques appliqués etc...) (**Chellali , 2007**).

Actuellement, les nanomatériaux phyto-synthétisés sont utilisés comme nano-engrais pour les plantes cultivées d'importance agricole, dans le respect de la garantie de leur utilisation en toute sécurité (**Gogos, 2012**). Cependant, divers nanomatériaux utilisés dans les pratiques agricoles modernes ont des impacts à la fois positifs et négatifs sur les plantes cultivées. Certaines études concernant l'impact des NPs d'oxydes de fer et de cuivre sur la croissance des céréales ont mis en évidence un effet optimisant, expliqué par l'importance du fer et du cuivre à plusieurs cycles vitaux de la plante. Ainsi, le fer et le cuivre, sont des éléments essentiels pour la croissance, le développement et la photosynthèse des plantes. Cependant, des concentrations élevées peuvent être toxiques (**Racuciu et al. 2007**).

Notre travail s'inscrit dans cette thématique. Il a pour objectif d'étudier les effets de différentes concentrations de deux nanoparticules métalliques : les NPs d'oxydes de fer et de cuivre sur une variété de blé dur (*Triticum durum*), à travers la mesure de quelques paramètres germinatifs, morphométriques et physiologiques

Nous nous sommes ainsi posé les questions suivantes dans la conception de notre travail :

- Ces deux nanoparticules ont-elles un effet bénéfique ou néfaste sur la germination du blé ?
- Utilisées aux mêmes concentrations, ces nanoparticules ont-elles le même degré de toxicité ?



MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Présentation du matériel biologique :

La présente étude a porté sur une variété de blé dur : *Triticum durum* Desf (Variété Siméto) (**Figure 1**) qui nous a été aimablement fourni par l'OAIC (Office Algérien Inter Professionnel des Céréales) de Annaba. Les principales caractéristiques de cette variété sont mentionnées dans le **tableau (I)**.



Figure 1 : La variété « Siméto » de blé dur.

Tableau I : Les caractéristiques agronomiques de la variété « Siméto » (Alayat, 2015).

Variété	Origine	Caractéristiques agronomiques et Culturales	Caractéristiques technologiques	Résistance aux maladies et aux différentes conditions climatiques
SIMETO	Variété de blé dur d'origine Italienne introduite en Algérie	Rendement élevé	<ul style="list-style-type: none"> - PMG: élevé - Qualité semoulière très bonne - Mitadinage :résistante 	<ul style="list-style-type: none"> - Oidium feuille: moyennement sensible - Oidium épi : résistante - Rouille brune : moyennement sensible - Résistante à la sécheresse et au froid

1.1. Description de la plante de blé dur :

Le blé dur (*Triticum turgidum* spp. *durum*) est une plante annuelle de la classe de monocotylédones de la famille des Poacées, de la tribu des Triticées et du genre *Triticum* (Tableau II).

En termes de production commerciale et d'alimentation humaine, cette espèce est la deuxième plus importante du genre *Triticum* après le blé tendre. Leur famille comprend 600 genres et plus de 5000 espèces (Feillet, 2000).

Tableau II: Classification du blé dur d'après Feillet (2000).

Embranchement	Angiosperms
Sous-embranchement	<i>Spermaphytes</i>
Classe	<i>Monocotyledons</i>
Ordre	<i>Glumiflorales</i>
Super ordre	<i>Comméliniflorales</i>
Famille	<i>Graminae et/ouPoaceae</i>
Tribu	<i>Triticeae</i>
Sous tribu	<i>Triticinae</i>

Ils'agit d'une graminée annuelle de hauteur moyenne et dont le limbe des feuilles est aplati. L'inflorescence en épi terminal se compose de fleurs parfaites (Soltner, 1998). Le système racinaire comprend des racines séminales produites par la plantule durant la levée, racines adventives qui se forment plus tard à partir des nœuds à la base de la plante et constituent le système racinaire permanent. Le blé dur possède une tige cylindrique, dressée, habituellement creuse et subdivisée en entre-nœuds. Certaines variétés possèdent toutefois des tiges pleines. Le chaume (talles) se forme à partir de bourgeons axillaires aux nœuds à la base de la tige principale (Bozzini, 1988). Le nombre de brins dépend de la variété, des conditions de croissance et de la densité de plantation (Clark et al.,2002). Comme pour d'autres graminées, les feuilles de blé dur se composent d'une base (gaine) entourant la tige, d'une partie terminale qui s'aligne avec les nervures parallèles et d'une extrémité pointue. Au point d'attache de la gaine de la feuille se trouve une membrane mince et transparente (ligule) comportant deux petits appendices latéraux (oreillettes) (Bozzini, 1988 ; Ait Kaki, 1993 ; Meksem, 2007 ; Issaad, 2013).

1. 2. Composition biochimique et valeurs nutritives du blé dur:

Le grain de blé est principalement constitué d'amidon (environ 80% de la matière sèche), de protéines (52%) et de pentosanes (90,6%) (Selon les variétés et les conditions de culture). Les autres constituants, pondéralement mineurs, sont les lipides, la cellulose, les sucres libres, les minéraux et vitamines. Ces constituants se répartissent de manière inégale au sein des différentes fractions histologiques du grain. L'amidon se trouve en totalité dans l'albumen amylicé. La couche à aleurone est particulièrement riche en protéines, en matières minérales et en pentosanes, qui sont les constituants dominants de ses parois cellulaires. Le péricarpe est essentiellement constitué de ces pentosanes et de cellulose. Le germe est riche en protéines, en lipides et en sucres libres (**Feillet, 2000**). La composition biochimique des principaux constituants du tissu du grain de blé est représentée dans le **tableau III**.

Tableau III : Composition biochimique du tissu d'un grain de blé dur (**Feillet, 2000**).

	Péricarpe %	Aleurone %	Albumen %
Protéines	10	30	12
Lipides	0	9	2
Amidon	0	0	82
Sucre réducteur	0	0	1,8
Pentosane	43	46	1,6
Cellulose	40	3	0,1
Minéraux	7	2	0,5

1.3. Origine géographique du blé dur :

Le moyen orient serait le centre géographique d'origine, à partir duquel, l'espèce *Triticum durum* s'est différenciée dans trois centres secondaires différents qui sont le bassin occidental de la Méditerranée, le sud de la Russie et le Proche Orient. Chaque centre a donné naissance à des groupes de variétés botaniques, possédant des caractéristiques phénologiques, morphologiques et physiologiques spécifiques (Lev-Yadun et al., 2000). L'Afrique du Nord est considérée comme centre secondaire d'après la classification de l'espèce (Feldman, 2001).

1.4. Cycle de vie du blé dur :

Le cycle évolutif du blé se divise en trois grandes périodes, la période de végétation, la période de reproduction, et la période de maturation (Tableau IV).

Tableau IV: Cycle de développement du blé (Jacques, 1970).

Périodes	Phase	Phénomène
Période de végétation	Germination – Levée	Sortie de la première feuille
	Levée – tallage	3 feuilles, 5-6 racines primaires, Formation du plateau tallage, Développement des racines secondaires, Application de la première ébauche d'épillet
	Tallage – Montaison	Formation des talles herbacées
Période de reproduction	Montaison	Formation de matière sèche et talles épis
	Epiaison	Différenciation des stigmates, Organisation détaillée des épillets, Fécondation – floraison
	Maturation des ovules	Grossissement des grains, Jaunissement de la plante, Elaboration de matière sèche
Période de maturation	Maturité	Gonflement du grain, dessiccation, récolte

2. Présentation du matériel chimique :

Les nanoparticules retenues pour la réalisation de cette expérimentation sont : les nanoparticules d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'oxyde cuivre (CuO) (**Figure 2**).



Figure 2: Poudres de NPs de Fe_2O_3 (A) et CuO (B).

Les oxydes de fer et de cuivre nanométriques ont été élaboré au Laboratoire de Chimie des Matériaux de l'Université Badji Mokhtar Annaba, ils sont respectivement de tailles de 30 et 25 nm.

3. Protocole expérimental :

3.1. Mise en suspension des NPs :

En vue de leur utilisation pour les tests biologiques, les nanoparticules de Fe_2O_3 et CuO sont mises en suspension dans de l'eau distillée (pH 5,5). Pour la réalisation de l'essai nous avons choisi quatre concentrations de NPs, à savoir : 25, 50, 75 et 100 mg/L (les mêmes concentrations ont été utilisés pour les deux types de nanoparticules). La dispersion des nanoparticules dans l'eau est réalisée grâce à un agitateur magnétique. L'agitation sert à briser les liaisons faibles entre les particules.

3.2. Préparation des graines de blé :

Les graines de blé dur sont désinfectées dans une solution d'hypochlorite de sodium à 5% pendant 10 minutes pour éliminer toute contamination fongique, puis rincées abondamment à l'eau distillée. Les graines sont méticuleusement choisies avant leur utilisation, elles doivent être saines, et ne présentent aucune maladie (pas de cassures ni signes apparents de maladies). Pour faciliter et homogénéiser leur germination, les graines sont placées pendant une nuit dans de l'eau distillée (**Alayat, 2015**).

3.3. Conduite de l'essai et traitements :

Pour évaluer l'effet des deux nanoparticules choisies sur la germination des graines de blé dur nous avons effectué un essai en boîtes de pétri servant à l'étude des paramètres germinatifs et morphométriques. Les graines de blé dur sont mises à germer dans des boîtes de pétri tapissées de papier filtre à raison de 10 grains par boîtes (**Meksem et al., 2007**). Le traitement par les différentes concentrations (25, 50, 75 et 100 mg/L) des deux nanoparticules est réalisé par l'arrosage quotidien des boîtes de pétri par un volume de 8ml/boîte pour chaque solution filles préparée (le témoin est arrosé par de l'eau distillée), pendant 8 jours. Les graines sont cultivées sous conditions contrôlées avec une photopériode lumière/obscurité de 16/08 heures, et des températures comprises entre 20-25°C. Pour chaque concentration des deux nanoparticules, trois répétitions sont effectuées (**Figure 3**).



Figure 3 : Dispositif expérimental de l'essai avant et après l'arrosage (culture en boîte de pétri).

4. Paramètres étudiés :

Les paramètres retenus pour évaluer l'effet des nanoparticules d'oxydes métalliques sur les graines de blé au cours et après la germination sont appréciés à travers certaines mesures :

4.1. Mesure des paramètres germinatifs :

4.1.1. Taux de germination :

Le taux de germination est déterminé à la fin de l'essai (après 8 jours) à partir du nombre total des graines (NT) mises en germination et le nombre total de graines germées (NI). Il s'exprime en (%) selon la formule suivante (Ahoton *et al.*, 2009) :

$$\text{TG}(\%) = (\text{NI}/\text{NT}) \times 100$$

Les graines sont considérées comme ayant germées quand leurs racines atteignent 2 mm de longueur (Ben-Hamouda *et al.*, 2001).

4.1.2. C

Il s'agit de calculer chaque jour la vitesse de germination sous les différentes concentrations de nanoparticules. Elle est exprimée par le nombre de graines germées à 24, 48, 72,, 192 h après le début de l'expérience. La vitesse de germination est d'une importance majeure, car elle permet de prévoir la vigueur des plantules durant le processus de germination. Elle est donnée par la formule suivante (Mazliak, 1998) :

$$\text{Cinétique de germination} = (\text{nombre de graines germées le } 1^{\text{er}} \text{ jour}/1) + (\text{nombre de graines germées}/2) + \dots + (\text{nombre de graines germées le } n^{\text{ème}} \text{ jour}/n) \text{ (Mazliak, 1998)}$$

La mesure des paramètres morphométriques a été réalisée à la fin du traitement (après 8 jours).

4.2.1. Longueur moyenne des racines :

Les paramètres d'élongation racinaire sont déterminés sur des germinations en présence ou non des nanoparticules. La longueur des racines de chaque plantule est mesurée à l'aide d'une règle graduée pour chaque traitement. Nous retenons la longueur maximale pour chaque graine.

4.2.2. Longueur moyenne des coléoptiles :

La longueur de la coléoptile de chaque plantule issue de la germination est mesurée pour chaque traitement. Nous procédons ensuite au calcul de la moyenne pour chaque boîte de pétri.

4.3. Mesure des paramètres physiologiques :

4.3.1. Dosage des chlorophylles et des pigments caroténoïdes :

Pour le dosage des pigments photosynthétiques, un essai de 14 jours à été réalisé dans des boîtes de pétri. Les graines de blé témoins et traitées ont été arrosées pendant la première semaine (7 jours) avec de l'eau distillée. A partir du 8^{ème} jour, un arrosage par les concentrations croissantes de nanoparticules d'oxydes de Fe₂O₃ et CuO à été réalisé. A la fin du traitement, les plantules ont été récupérées pour servir au dosage des chlorophylles et des pigments caroténoïdes. L'extraction des chlorophylles et des caroténoïdes est effectuée selon la méthode de **Holden (1975)**, qui consiste en une macération du végétal dans de l'acétone. Le traitement des échantillons se fait comme suit :

On pèse 1 g de feuilles de blé coupées en petits morceaux et broyées dans un mortier avec 25 ml d'acétone à 80% et une pincée de bicarbonate de calcium (CaCO₃). Après le broyage total, la solution est ensuite filtrée et mise dans des boîtes noires afin d'éviter l'oxydation des chlorophylles par la lumière.

La lecture se fait aux trois longueurs d'onde 663 nm, 645 nm et 470 nm après étalonnage du spectrophotomètre avec la solution d'acétone à 80%. Les teneurs en chlorophylles totales et caroténoïdes, sont exprimées en mg/g de PF. Les équations ci-dessous nous permettent de calculer les valeurs des chlorophylles (**Arnon, 1949**):

$$\text{Chl a} = 12,7 \times \text{DO}_{663} - 2,69 \times \text{DO}_{645}$$

$$\text{Chl b} = 22,9 \times \text{DO}_{645} - 4,68 \times \text{DO}_{663}$$

$$\text{Chl a+b} = 20,2 \times \text{DO}_{645} + 8,02 \times \text{DO}_{663}$$

La teneur en caroténoïdes a été calculée selon l'équation suivante :

$$\text{C} = 1000 \times \text{DO}_{470} - 1,90 \text{Chl a} - 63,14 \text{chl b} / 214$$

5. Etude statistique :

Les résultats obtenus ont fait l'objet d'une analyse statistique grâce au logiciel Minitab (Version 14.0). Pour chaque paramètre mesuré, trois répétitions ont été analysées (n=3). Une analyse de la variance à un critère (concentration) et à deux critères de classification (concentration, temps) a été effectuée en utilisant le test ANOVA. Les moyennes des groupes témoins et traités ont été comparées deux à deux en utilisant le test *t* de Student. Les différences sont considérées comme significatives lorsque $p \leq 0,05$ (*) ; hautement significatives lorsque $p \leq 0,01$ (**) et très hautement significatives lorsque $p \leq 0,001$ (***) .



RÉSULTATS

1. Effet des nanoparticules d'oxydes de fer (Fe_2O_3) et de cuivre (CuO) sur les paramètres germinatifs :

1.1. Effet des nanoparticules d'oxydes de fer (Fe_2O_3) et de cuivre (CuO) sur le taux de germination après 8 jours de traitement :

L'effet des nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre sur le taux de germination des graines de blé dur après 8 jours d'exposition est représenté dans la **figure (4)**.

Nous constatons que le taux de germination des graines de blé dur tend à diminuer de manière dose-dépendante et inversement proportionnelle aux concentrations croissantes de nanoparticules. Ainsi, chez les graines traitées par la concentration 25 mg/L de NPs d'oxyde fer, aucune différence significative ($p > 0.05$) n'a été notée, par contre chez les traitées par la même concentration de NPs d'oxyde de cuivre, une diminution significative ($p \leq 0.05$) a été enregistrée. Parallèlement, nous notons des réductions hautement significatives ($p \leq 0.01$) du pourcentage de germination chez les graines traitées par la concentration 50 mg/L des deux NPs, où nous enregistrons des taux de l'ordre de 63 et 40 %, pour les nanoparticules de Fe_2O_3 et de CuO , respectivement. Concernant les graines traitées par les concentrations 75 et 100 mg/L, nous notons des diminutions très hautement significatives ($p \leq 0.001$) pour les deux nanoparticules testées, et ce par rapport aux témoins. En effet, les taux de germination sont estimés à environ 56 et 30% pour les graines traitées par la concentration 75 mg/L et diminuent jusqu'à 53 et 16% chez les traitées par la plus forte concentration (100 mg/L) des NPs de Fe_2O_3 et de CuO , respectivement, alors que chez les graines témoins ce taux est estimé à environ 95%.

L'analyse de la variance à un critère de classification révèle un effet concentrations très hautement significatif pour les deux nanoparticules ($p \leq 0.001$).

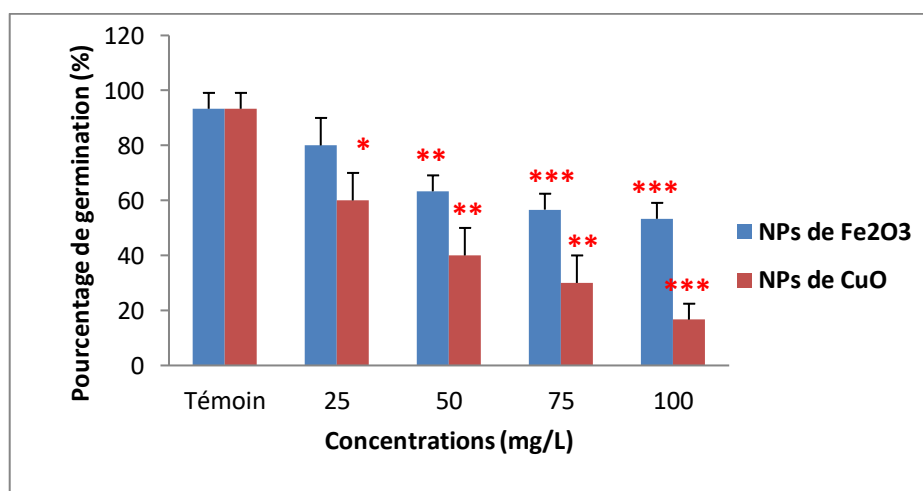


Figure 4 : Effet des nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre sur le taux de germination des graines de blé dur après 8 jours d'exposition.

1.2. Effet des nanoparticules d'oxydes fer (Fe₂O₃) et de cuivre (CuO) sur la cinétique de germination :

La figure ci-dessous représente l'effet du traitement par les nanoparticules d'oxydes de fer (A) et de cuivre (B) sur la cinétique de germination du blé dur.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que le traitement affecte négativement la cinétique de germination des graines de blé, et ce à travers un ralentissement du processus de germination, en fonction des concentrations croissantes des deux nanoparticules. Ainsi, nous relevons que la germination commence à partir de la 24^{ème} h de l'essai pour toutes les concentrations des deux nanoparticules avec des valeurs qui diminuent de manière dose-dépendante et très hautement significative ($P \leq 0,001$), par rapport aux témoins, à l'exception des graines exposées à la plus forte concentration (100 mg/L) des NPs de CuO qui commencent à germer à partir du 2^{ème} jour de l'essai où nous notons une réduction considérable de la capacité germinative. Les pics de germination sont observés au 5^{ème} jour de l'essai avec une moyenne d'environ 9 graines pour les lots témoins contre environ 5 graines pour les lots traités par les deux plus fortes concentrations (75 et 100 mg/L) des NPs de Fe₂O₃ et environ 2 graines pour les traitées par les mêmes concentrations de NPs de CuO. A partir du 5^{ème} jour et jusqu'à la fin de l'essai, nous remarquons une stabilisation du nombre de graines germées pour tous les lots témoins et traités par les NPs de Fe₂O₃. Il est à noter que l'arrêt de la germination apparaît plus précocement (au 4^{ème} jour) pour les NPs de CuO, ce qui indique l'intensité de l'effet toxique de ces nanoparticules.

Le traitement des résultats par l'analyse de la variance à deux critères de classification révèle un effet temps et un effet concentrations très hautement significatifs ($P \leq 0,001$), et un effet interaction temps / concentrations non significatif ($p \leq 0,05$).

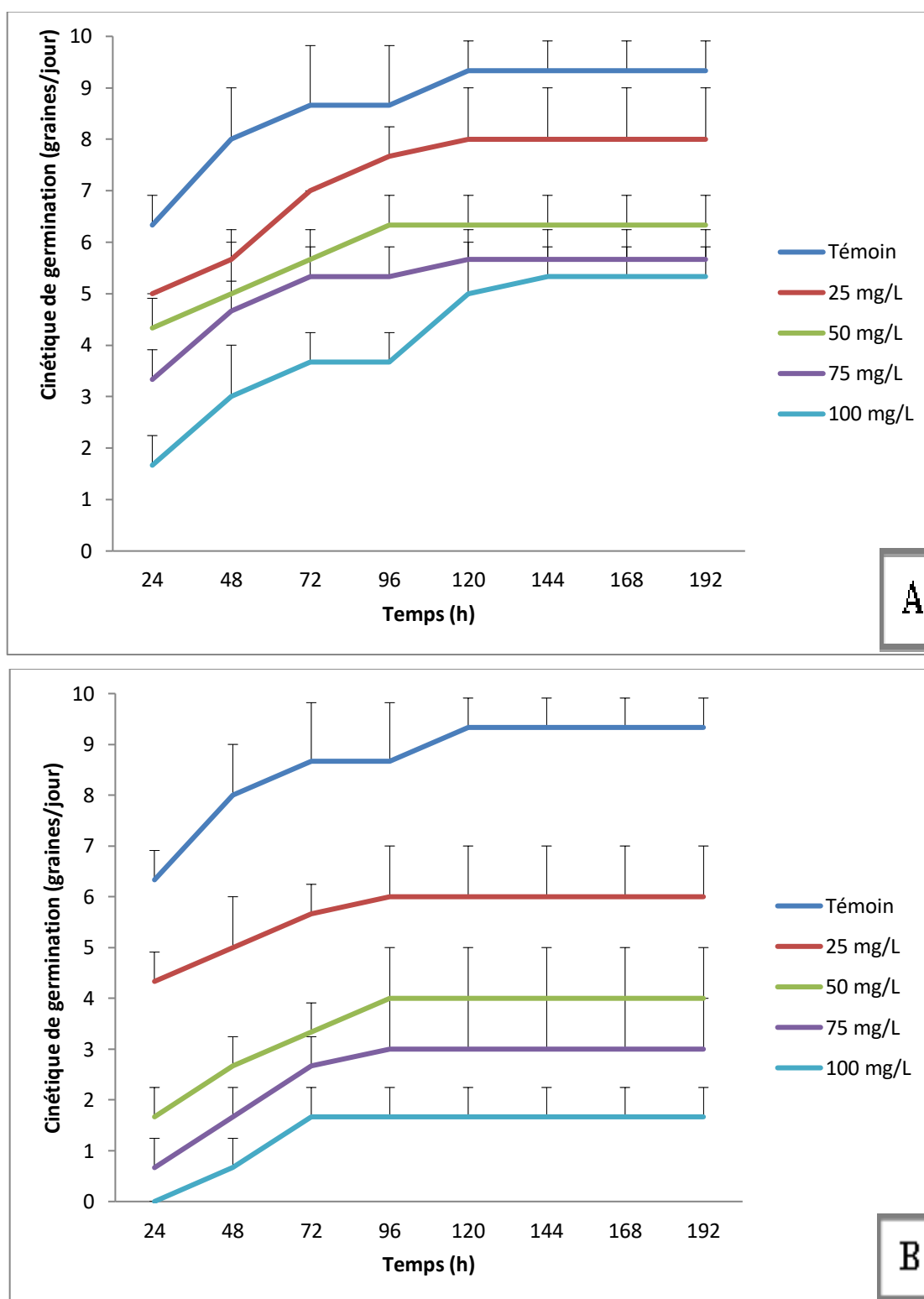


Figure 5 : Effet des nanoparticules d’oxydes de fer (A) et de cuivre (B) sur la cinétique de germination des graines de blé dur.

2. Effet des nanoparticules d'oxydes de fer (Fe₂O₃) et de cuivre (CuO) sur les paramètres morphométriques :

2.1. Effet des nanoparticules d'oxydes de fer (Fe₂O₃) et de cuivre (CuO) sur la longueur moyenne des racines :

La **figure (6)** met en évidence l'effet des nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre sur la longueur moyenne des racines de blé dur après 8 jours de traitement.

Nous constatons une diminution dose-dépendante de la longueur moyenne de racines des graines traitées par les concentrations croissantes d'oxydes de fer et de cuivre, par rapport aux témoins. Cette diminution est significative ($p \leq 0.05$) chez les lots traités par la concentration 75 mg/L des deux NPs et la concentration 100 mg/L des NPs de Fe₂O₃ uniquement. Une diminution ($p \leq 0.05$) significative a été également notée chez les lots traités par les concentrations 25 et 50 mg/L de NPs de CuO. Cependant, aucune différence significative ($p > 0.05$) n'a été enregistrée chez les traités par les mêmes concentrations concernant l'oxyde de fer. Par ailleurs, le traitement des graines par la plus forte concentration (100 mg/L) des NPs de CuO a révélé une réduction hautement significative ($p \leq 0.01$) où nous notons une longueur moyenne des racines d'environ 0.43 cm, comparativement à celle des témoins qui est de l'ordre de 5.52 cm. Chez les graines traitées par la même concentration (100 mg/L) de NPs de Fe₂O₃ l'élongation des racines est d'environ 3 cm.

L'analyse de la variance à un critère de classification révèle un effet concentrations très hautement significatif pour les deux nanoparticules ($p \leq 0.001$).

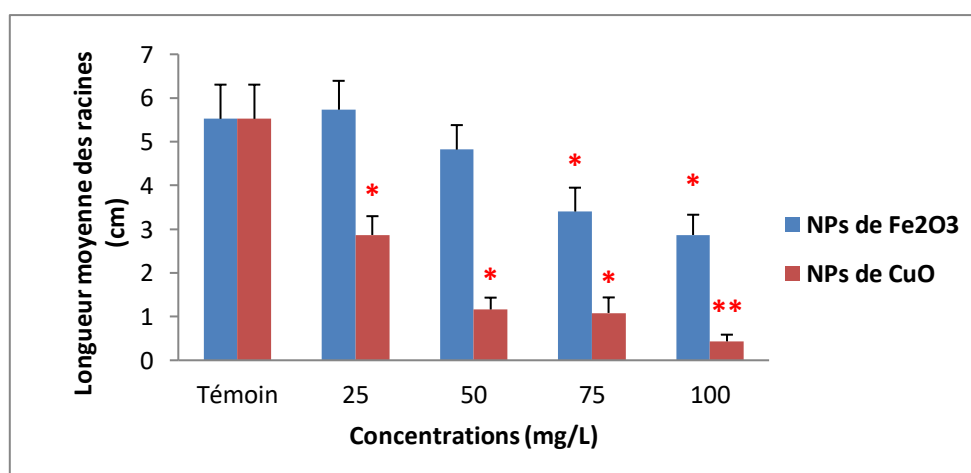


Figure 6 : Longueur moyenne des racines (en cm) des graines de blé dur témoins et traitées par les nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre après 8 jours d'exposition.

2.2. Effet des nanoparticules d'oxydes de fer (Fe_2O_3) et de cuivre (CuO) sur la longueur moyenne des coléoptiles :

Les résultats relatifs à l'effet des nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre sur l'élongation des coléoptiles sont représentés dans la figure ci-dessous.

Nous constatons une diminution dose-dépendante de la longueur moyenne des coléoptiles chez les lots traités par les deux nanoparticules par rapport aux lots témoins. Cette réduction est significative ($P \leq 0,05$) pour la concentration 50 mg/L et hautement significative ($P \leq 0,01$) pour les deux plus fortes concentrations de NPs de Fe_2O_3 . Parallèlement, une diminution très hautement significative ($P \leq 0,001$) a été enregistrée chez les lots traitées par les NPs de CuO , comparativement aux témoins, et ce pour toutes les concentrations testées. En effet, la longueur moyenne des coléoptiles passe d'environ 8 cm chez les lots témoins à 3.3 et 1.02 cm chez ceux traités par la concentration 75 mg/L des nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre, respectivement et atteint des valeurs de l'ordre de 3.12 et 0.33 cm pour la plus forte concentration (100 mg/L). Il convient de noter que la diminution de la longueur moyenne des coléoptiles observée chez les lots traités par la plus faible concentration (25 mg/L) des NPs de Fe_2O_3 est non significative ($p > 0.05$).

L'analyse de la variance à un critère de classification révèle un effet concentrations très hautement significatif pour les deux nanoparticules ($p \leq 0.001$).

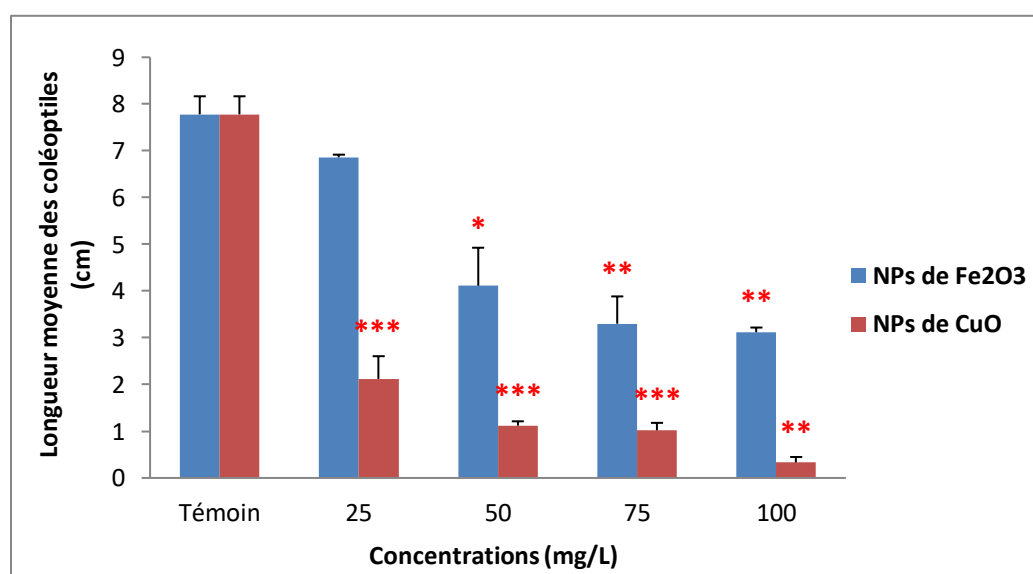


Figure 7: Longueur moyenne des coléoptiles (en cm) de graines de blé dur témoins et traitées par les nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre après 8 jours d'exposition.

3. Effet des nanoparticules d'oxydes de fer (Fe₂O₃) et de cuivre (CuO) sur la synthèse des pigments photosynthétiques :

Le **tableau V** regroupe l'ensemble des résultats concernant l'effet des nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre sur la synthèse de la chlorophylle et des caroténoïdes au niveau des feuilles des plantules de blé dur.

Tableau V: Effet des nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre sur la teneur en chlorophylle a, b, a+b et en caroténoïdes.

	Concentrations (mg/L)	Chlorophylle a (mg/g MF)	Chlorophylle b (mg/g MF)	Chlorophylle a+b (mg/g MF)	Caroténoïdes (mg/g MF)
	Témoin	5,50 ± 1,34	10,24 ± 0,49	15,75 ± 22,14	6,51 ± 2,50
Traitement par le NPs d'oxyde de fer	25	6,66 ± 0,47	12,13 ± 1,58	18,79 ± 1,91	6,76 ± 1,1
	50	6,82 ± 0,797	14,20±0,47**	21,03±1,27*	7,5 ± 2,02
	75	6,91 ± 0,21	15,06 ± 2,18**	21,98 ± 2,1*	7,74 ± 1,16
	100	9,16 ± 1,5*	17,87 ± 0,9**	27,04±1,94**	8,31 ± 0,4
Traitement par les NPS d'oxyde cuivre	25	8,23 ± 0,98	13,67 ± 0,26**	21,9 ± 1,14**	9,99 ± 2,2
	50	8,67 ± 1,29	16,14 ± 0,4***	24,82±0,93**	9,75 ± 2,61
	75	8,79 ± 1,57	16,82±0,28***	25,61±1,78**	8,33 ± 1,31
	100	10,02 ± 0,27*	18,90 ± 0,7***	28,93±0,54**	7,71 ± 0,27

Nos résultats montrent une augmentation des teneurs en chlorophylle a, b, a+b et en caroténoïdes des feuilles de plantules traitées par rapport à celles témoins. Concernant la teneur en chlorophylle a, cette augmentation n'est significative que chez les traitées par la plus forte concentration (100 mg/L), où nous enregistrons des valeurs de l'ordre de 9.16 et 10.02 mg/g de MF pour les NPs d'oxydes de fer et de cuivre, respectivement. En revanche chez les lots témoins, la teneur en chlorophylle a ne dépasse pas 5.5 mg/g de MF.

Quant aux teneurs des chlorophylles (b et a+b), des différences hautement significatives ($p \leq 0.01$) et très hautement significatives ($p \leq 0.001$) ont été enregistrées surtout pour les concentrations 50, 75 et 100 mg/L des deux nanoparticules. En effet, le taux de chlorophylle b passe d'une valeur de 10.25 mg/g de MF chez les témoins, à environ 15 et 18 mg/g de MF dans les feuilles de plantules traitées par les deux plus fortes concentrations (75 et 100 mg/L) des NPs de Fe_2O_3 . Chez les lots traités par les mêmes concentrations (75 et 100 mg/L) des NPs de CuO, nous avons enregistré des valeurs respectives d'environ 17 et 19 mg/g de MF.

D'autre part, le traitement par les NPs de Fe_2O_3 et de CuO a induit une hausse de l'ordre de 71.68 et 83.68% chez les lots exposés à la plus forte concentration (100 mg/L), respectivement, par rapport aux témoins.

En ce qui concerne les pigments caroténoïdes, aucune différence significative n'est observée après traitement par les différentes concentrations des deux nanoparticules ($p > 0.05$).

L'analyse de la variance à un critère de classification révèle un effet concentrations hautement significatif ($p \leq 0.01$) pour la chlorophylle a, très hautement significatif ($p \leq 0.001$) pour les chlorophylles b et (a+b) et un effet non significatif ($p > 0.05$) pour les pigments caroténoïdes, et ce pour les deux nanoparticules testées.

Il convient de signaler que les effets des deux nanoparticules testées dans notre travail sont plus significatifs pour les traitements par l'oxyde de fer qu'en cuivre, et ce pour tous les paramètres étudiées.



DISCUSSION

Le développement et l'utilisation des nanoparticules dans divers procédés domestiques et industriels ont extrêmement augmenté au cours de ces dernières années. En effet, le caractère innovant et la grande efficacité de ces matériaux réside aussi bien dans leur nature chimique que dans leur taille nanométrique. Celles-ci leur confèrent des propriétés physico-chimiques exceptionnelles, offrant des possibilités illimitées de progrès scientifiques et technologiques révolutionnaires. Ils sont ainsi employés dans de nombreux domaines très variés, tels que la médecine, la biologie, la chimie, l'électronique, la mécanique, l'ingénierie, ou encore l'informatique, et sont principalement présents dans plus de 1800 produits de consommation courante (Xiao et al., 2008 ; Aguilar, 2013 ; Bour, 2015).

Cependant, l'utilisation grandissante de ces nanomatériaux suscite aujourd'hui tant d'interrogations et de craintes du fait du sérieux manque d'informations quant à leur devenir et leur toxicité potentielle aussi bien sur la santé humaine qu'environnementale (Sajid et al., 2015). Les raisons de cette inquiétude scientifique sont basées sur la méconnaissance des interactions existantes entre ces nanoparticules et les systèmes biologiques (Simonin, 2015).

Afin de mieux répondre aux interrogations soulevées par l'utilisation croissante des nanoparticules, la nanotoxicologie se développe parallèlement aux nanotechnologies, et vise à étudier la toxicité sur les systèmes vivants et l'environnement. La nanotoxicologie a non seulement pour objectif de développer des modèles d'études pour connaître les facteurs influençant la fréquence et la gravité des effets biologiques des nanoparticules, mais également de caractériser ces effets biologiques (Triboulet, 2013 ; Kurtz-Chalot, 2014).

La toxicité des NPs d'oxydes de fer (Fe_2O_3) et de cuivre (CuO) a été évaluée dans de nombreux modèles cellulaires et par diverses méthodes (Alberts et al., 1983 ; Karlsson et al., 2009 ; Midander et al., 2009 ; Yang et al., 2017). Les nombreuses études tentant d'établir une relation dose/réponse ont révélé l'importance de la taille des NPs et/ou de leur surface, qui influencent grandement leur toxicité.

Sur la base de plusieurs travaux scientifiques réalisés, il est évident que la plupart des nanoparticules sont toxiques pour les plantes à haute concentration (Etxeberria et al., 2006 ; Ma et al., 2010 ; Dietz et Herth, 2011). Dans ce contexte, notre étude a pour objectif d'évaluer les effets de deux nanoparticules d'oxydes métalliques (Fe_2O_3 et CuO) sur une variété de blé dur (*Triticum durum* : variété Siméto), qui constitue la base de l'alimentation algérienne d'où sa grande consommation. Pour cela, nous avons évalué différents paramètres (germinatifs, morphométriques et physiologiques).

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'effet des deux nanoparticules sur la germination du blé dur en mesurant le pourcentage et la cinétique de germination.

La germination ou l'embryogénèse tardive, représente la première phase du développement d'une plante (**Tourte et al., 2005**), dans laquelle la graine retourne à la vie active après une période de dormance. Lors de la germination l'embryon augmente de volume par l'utilisation de l'énergie provenant de l'oxydation des réserves sous l'influence de l'action des différentes enzymes hydrolasiques, qui dégagent progressivement les enveloppes qui l'entourent, ce qui permet la sortie de la coléoptile et des radicelles. Dans cette phase la graine a besoin de conditions externes et internes favorables pour un développement normal. En effet la présence de xénobiotiques peut fortement affecter le processus de la germination (**Théron, 1964 ; Meyer et al., 2004**).

Nos résultats montrent que les nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre ont exercé un effet négatif sur le processus germinatif, ce qui s'est traduit par une diminution du pourcentage et de la cinétique de germination. En effet, l'inhibition de la germination des graines de blé peut être due à la capacité de ces nanoparticules à se lier aux groupements spécifiques de certains acides aminés, ce qui entraînerait une inhibition de l'activité des enzymes essentielles (**Ferfar, 2017**). Selon **Prado et al. (2000)**, la diminution du taux de germination est due à un processus de dormance osmotique développé sous des conditions de stress, représentant ainsi une stratégie d'adaptation, à l'égard des contraintes environnementales. Les résultats obtenus dans notre travail sont en accord avec ceux de **Alam et al. (2015)** et **Woo-Mi et al. (2008)** qui ont mis en évidence une inhibition de la germination et de la croissance des plantes de blé après exposition aux fortes concentrations des NPs de fer et de cuivre, respectivement. Les mêmes constatations ont été rapportées par **Benali et Bouguettaia (2020)** qui ont étudié l'effet de différentes concentrations de NPs de ZnO sur la germination du blé tendre « *Triticum aestivum* ». Ces auteurs expliquent la raison de la diminution de la germination à des concentrations élevées par l'augmentation de l'absorption et de l'accumulation des NPs à la fois dans l'espace extracellulaire et à l'intérieur des cellules, entraînant ainsi une réduction de la division et l'élongation cellulaires et l'inhibition des enzymes hydrolytiques impliquées dans la mobilisation des réserves au cours du processus de germination des graines.

Plusieurs travaux ont contrairement rapporté un effet stimulateur de la germination des plantes après exposition à différentes nanoparticules (NPs de fer, de cuivre de silice et de zinc)(Briatet *al.*, 2007 ; Alam *et al.*, 2015 ;Liu *et al.*, 2015 ; Paparella *et al.*, 2015 ; Rui *et al.*, 2018 ;Gavrish *et al.*, 2019 ; Benali et Bouguettaia, 2020). Selon Soybean (2002) ; Nel *et al.* (2006) ; Konate *et al.* (2017), la phytotoxicité des NPs dépend des concentrations utilisées. En effet, à faibles concentrations, les NPs d'oxydes métalliques de fer, de cuivre et de zinc sont susceptibles d'activer les processus physiologiques et biochimiques (ex : la stimulation de la biosynthèse de la chlorophylle) des plantes affectant favorablement leur germination et leur croissance.

D'autre part, nos résultats montrent également que les nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre ont réduit l'élongation des racines et des coléoptiles des plantules de blé dur. Ceci est en accord avec les résultats de Thakur *et al.* (2021) qui ont rapporté une diminution de la longueur des racines et des coléoptiles de blé tendre *Triticum aestivum* sous l'effet des NPs de Cu. Cette réduction pourrait être due, d'une part, à une perturbation de la biosynthèse hormonale, en particulier des auxines, qui favorisent la dégradation des réserves des semences nécessaires à la germination et à la croissance, et d'autre part, à une mort cellulaire qui entraîne automatiquement une réduction du développement (Banik et Luque, 2017). Des résultats similaires ont été également obtenus par Ma *et al.* (2010) concernant l'effet des NPs de TiO₂ et ZnO sur la germination et l'élongation des racines de blé tendre *Triticum aestivum*.

Donc, d'une manière globale, les NPs d'oxydes de fer et de cuivre semblent affecter la germination, la croissance et la morphogénèse des plantes, en perturbant de très nombreux mécanismes physiologiques, entraînant un nanisme des plantes (Woo-Mi *et al.*, 2008).

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à l'étude des effets des nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre sur la teneur en pigments photosynthétiques (chlorophylles et caroténoïdes).En effet, les teneurs en chlorophylles et en caroténoïdes, sont des paramètres susceptibles de nous indiquer un éventuel stress, car considérées comme biomarqueurs de la toxicité chez les végétaux (Dewez *et al.*, 2007).

La quantité de la chlorophylle des feuilles, peut être influencée par beaucoup de facteurs tels que l'âge des feuilles, la position des feuilles et les facteurs environnementaux (lumière, température et disponibilité en eau...) (Hikosaka *et al.*, 2006). Plusieurs auteurs rapportent une dégénération fréquente de la quantité de chlorophylles chez les plantes exposées à différentes concentrations de nanoparticules métalliques (An *et al.*, 2008; Ren *et*

al., 2011 ; Arora *et al.*, 2012 ; Chiahi *et al.*, 2016). D'après nos résultats, nous constatons, au contraire, une augmentation des taux de chlorophylle a, b et a+b des feuilles traitées par rapport à celles témoins. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de Karoun *et al.* (2011) et Sébastien *et al.* (2018) qui ont rapporté une augmentation du contenu chlorophyllien chez plusieurs espèces végétales, ce qui indique une stimulation de la photosynthèse. De plus, Schehata *et al.* (1999) et Devriese *et al.* (2001) rapportent une augmentation des teneurs en chlorophylles en présence de métaux ainsi que d'autres xénobiotiques. Ceci pourrait s'expliquer soit par le fait que les concentrations de cuivre et de fer, oligoéléments indispensables à plusieurs cycles vitaux de la plante particulièrement la photosynthèse, restent insuffisantes pour provoquer un stress oxydant, soit que les plantes, au début du stress, vont activer leur métabolisme pour maintenir l'homéostasie de la cellule d'où l'augmentation des teneurs en chlorophylles. Selon Mahakham *et al.* (2016), l'augmentation du taux de chlorophylle en présence des nanoparticules pourrait être due à une forte accumulation d'eau et de nutriments, ce qui entraîne une augmentation des performances physiologiques des plantes cultivées.

Parallèlement, nos résultats montrent aussi une augmentation de la teneur en caroténoïdes. Les mêmes résultats ont été rapportés par Chiahi *et al.* (2016) qui ont étudié l'effet des NPs de ZnO sur trois variétés de blé dur (Boussallem, Gtadur et Ouarsenis). D'après ces auteurs, les caroténoïdes sont parmi les antioxydants non enzymatiques, l'élévation du taux de ces pigments indique alors que les plantules de blé subissent un déséquilibre au niveau de la balance Red-Oxe (surproduction des espèces réactives de l'oxygène « ERO »), ce qui provoque une augmentation du taux des caroténoïdes afin d'éliminer le stress causé par ces ERO (Chiahi *et al.*, 2016).

Il convient de noter que les effets toxiques observés dans cette étude sont plus significatifs concernant le traitement par les NPs d'oxyde de cuivre en comparaison avec celles d'oxyde de fer aux mêmes concentrations. Cela pourrait être dû, comme ont suggéré Simon-Deckers *et al.* (2009), que la phytotoxicité des NPs métalliques varie non seulement en fonction de leur type et leur taille, mais dépend également de leur composition, leur état d'agglomération, les propriétés et l'ionisation de leur surface. En effet, la taille des NPs d'oxyde de cuivre utilisés dans notre travail est plus petite (25 nm) que celle des NPs d'oxyde de fer (30 nm), ce qui pourrait expliquer leur forte toxicité. Ainsi, plus les NPs sont petites, plus leur surface réelle, ou surface spécifique (c'est-à-dire le rapport de la surface sur leur masse), est grande, plus elles sont solubles dans l'eau, et plus leur capacité à réagir avec les

systèmes biologiques est importante. Donc, il semble évident que la taille nanométrique soit un élément important de la toxicité des nanoparticules (**Karlsson et al., 2009; Midander et al., 2009**). De plus, **Yasmeen et al. (2015)** concluent dans leurs études sur la germination du blé tendre « *Triticum aestivum* » après exposition aux NPs, que les NPs de fer avaient un effet stimulateur, tandis que celles du cuivre avaient un effet inhibiteur de la germination des graines et de la croissance des plantules. Cela confirme nos constatations à propos de la forte toxicité des NPs d'oxyde de cuivre par rapport à celles du fer.



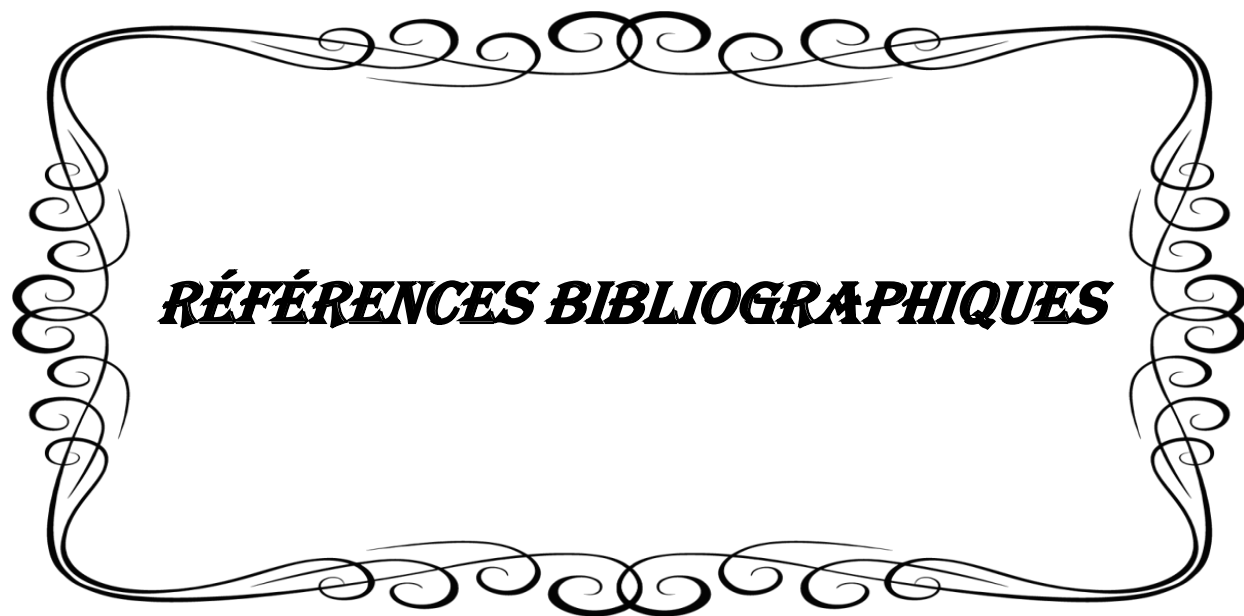
CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les nanoparticules ont été récemment exploitées dans le système agricole, mais elles posent toujours des défis aux chercheurs en raison de leur taille, de leur toxicité, de leur réactivité avec les facteurs environnementaux et vis-à-vis des systèmes biologiques.

A cet égard, la présente étude révèle les effets toxiques des nanoparticules d'oxydes de fer et de cuivre à différentes concentrations (25, 50, 75 et 100 mg/L) sur l'ensemble des paramètres germinatifs, morpho-métriques et physiologiques du blé dur « *Triticum durum* ». D'une manière générale, la phyto-toxicité de ces NPs s'est manifestée par une réduction du pouvoir germinatif, à travers une diminution du pourcentage et de la cinétique de germination, ainsi qu'une diminution de l'élongation racinaire et des coléoptiles. D'autre part, le traitement par ces deux NPs semble stimuler la photosynthèse, à travers l'augmentation des teneurs en pigments photosynthétiques (chlorophylles a, b, a+b et caroténoïdes). Il est évident, à partir des résultats obtenus, que les NPs d'oxyde de cuivre sont plus toxiques que ceux du fer, probablement en raison de leur petite taille.

Notre travail reste préliminaire et doit être approfondi, il serait donc intéressant de :

- Réaliser des essais avec une batterie de concentrations moins faibles pour pouvoir déterminer la concentration optimale permettant d'améliorer le pouvoir germinatif des graines.
- Etudier l'effet de ses nanoparticules sur d'autres variétés de céréales afin de déterminer la variabilité des réponses et les degrés de tolérances de celles-ci.
- Réaliser le dosage de certains biomarqueurs du stress oxydant (GSH, GST, CAT, GPX, APX,...) afin de mieux comprendre les mécanismes d'action toxiques à une échelle subcellulaire.
- Réaliser des coupes histologiques au niveau des racines afin de localiser les sites d'accumulation de ces NPs et de mieux caractériser les lésions engendrées au niveau tissulaire.

A decorative rectangular frame with intricate scrollwork and flourishes, centered on the page. The frame is composed of a single continuous line that forms a series of elegant, overlapping loops and curves around the perimeter.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Aguilar ZP. (2013).** Chapter 7 - Nanopharmacology. *Nanomaterials for Medical Applications*, Aguilar ZP (Édit.) Elsevier. p 293-360.
- **Ahoton L., Adjakpa J., M'po, I., et Akpo E. (2009).** Effets des prétraitements des semences sur la germination de *Prosopis african* Alexandria University: (Guill., Perrot. et Rich) Taub (Caesalpiniaceae) .(éd. Trop.27(4) :233-238). Egypt.
- **Aissa A., Mhiri A. (2000).** La fertilisation phospho-potassique des céréales en Tunisie. *Revue de l'INAT*, Vol. 15, n° 2, pp. 7-14.
- **Ait Kaki Y.(1993).** Contribution à l'étude des mécanismes morfo physiologiques de tolérance au stress hydrique sur 05 variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.). Mémoire de Magistère. Université d'Annaba, p130.
- **Alayat. (2015).** Etude de l'Impact Toxicologique de Certains Agents Chimiques sur la Qualité des Céréales « Cas du Blé et de l'Orge, p68- 96.
- **Alberts B., Johnson A., Lewis J. (1983).** The extracellular matrix of the animals. In *Molecular Biology of the Cell*, 4th edition. Garland Science, New York. 692-713 p.
- **An J., Zhang M., Wang S., Tang J . (2008).** Physical, chemical and microbiological changes in stored green asparagus spears as affected by coating of silver nanoparticles– PVP. *LWT–Food Sci. Technol.* 41, 1100–1107.
- **Arnon. (1949).** Stratégies de défense observées chez le blé comme réponse à l'induction d'un stress oxydatif, p81.
- **Arora S., Sharma P., Kumar S., Nayan R., Khanna P.K., Zaidi M.G.H . (2012).** Gold–nanoparticle induced enhancement in growth and seed yield of *Brassica juncea*. *Plant Growth Regul.* 66, 303–310.
- **Benali W et Bouguettaia A. (2020).** Effets d'une nano molécule sur la germination de quelques espèces cultivées. Mémoire de Master de l'université Kasdi Merbah de Ourgla. p 36.
- **Ben-Hammouda M., Ghorbal H., Kremer R., and Oueslati O. (2001).** Allelopathic effects of barley extracts on germination and seedlings growth of bread and durum wheats.*Agronomy* 21, INRA, p. 65-71.
- **Bonjean A., Picard E. (1991).** Les céréales à paille. Origine-histoire-économie- sélection. Ligugé; Poitiers : Aubin imprimeur. 36p.
- **Bour A. (2015).** Effets écotoxicologiques de nanoparticules de dioxyde de cérium en milieu aquatique : d'une évaluation en conditions monospécifiques à l'étude de la chaîne trophique expérimentale en microcosme. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, France, P271.

- **Bozzini A. (1988).** Origin, distribution, and production of durumwheat in the world. Durum Wheat : Chemistry & Technology. G. Fabriani and C. Lintas, eds. Am. Assoc. Cereal Chem. : St. Paul, MN. P 1-16 .
- **Briat J.F., Curie C., Gaymard F. (2007).** Iron utilization and metabolism in plants. Curr. Opin. 368 Plant Biol. P10, 276-282.
- **Chellali B, (2007).** Marché mondial des céréales : L'Algérie assure sa sécurité alimentaire.
- **Chiahi N., Bouloudenine M., Daira N.H.,Guerfi N .and Brinis L .(2016).** L'impact des nanoparticules ZnO sur les paramètres physiologiques et biochimiques chez le blé dur (*Triticum turgidum* ssp .durum). *journal of new sciences , Agriculture and biotechnology*, 27(12),1549-1558.
- **Clarke CI., Schober TJ and Arendt EK. (2002).** Effect of single strain and traditional mixed strain starter cultures on rheological properties of wheat dough and on breadquality. *Cereal Chemistry*, p79, 640-647.
- **Daniel J, Fiorino. (2010).**Voluntary initiatives regulation and nanotechnology oversight: Charting a Path. P56.
- **Devriese M., Tsacalond V., Garboyo IJ., Leon R., Vilchez C ., Vigala.J. (2001) .** Effect of heavy metals on nitrate assimilation in eukaryotic microalga, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Plant Physiol Biochem*, Vol 39, 443-448.
- **Dietz K.J. et Herth S. (2011).** Nanotoxicologie végétale. *Trends Plant Sci.* 16, 582– 589.
- **Djermoun A, (2009).** La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. *Revue Nature et Technologie.* n°01 /Juin .45-53 P.
- **Dutta j .(2011).**Toxicity of ZnO and TiO₂ Nanoparticles on Germinating Rice Seed *Oryza sativa* L. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics*, Vol. 1, No. 4
- **Dewez, D., Didur, O., Vincent-Heroux, J. And Popovic, R., (2007).** Validation of photosynthetic-fluorescence parameters as biomarkers for isotopuron toxic effect on alga *Scenedesmus obliquus*. *Environmental pollution*, 151(1), 93-100p.
- **Etxeberria E., Gonzalez P., Pozueta-Romero J., et Romero J.P. (2006).** Absorption endocytaire en phase fluide de nano-sphères artificielles et de points quantiques fluorescents par des cellules cultivées de sycomore: preuves de la distribution de solutés dans différents compartiments intracellulaires. *Signal d'usine. Comportement.* 1, 196–200. doi: 10.4161 / psb.1.4.3142.
- **Farhat Yasmeen., Abdul Razzaq., M. Naveed Iqbal., Hafiz Muhammad Jhanzab. (2015).** Effect of silver, copper and iron nanoparticles on wheat germination. *Internation Journal of Biosciences.* Vol. 6, No. 4, p. 112-117.

- **Fefarr M , (2017).**Toxicité et bioaccumulation de pesticides sur quelques variétés de blé dur (T. durumDesf.). Thèse de doctorat : Département de biologie. Annaba. 373p.
- **Feldman M.(2001).** Origin of Cultivated Wheat, In Bonjean AP et WJ, Angus (Éd), The World Wheat Book: a history of wheat breeding, Intercept Limited, Andover, Angleterre, p3-58.
- **Feng Y., Cui X., He S., Dong G., Chen M., Wang J. & Lin X. (2013).** The role of metal nanoparticles in influencing arbuscular mycorrhizal fungi effects on plant growth. *Environmental Science and Technology*, 47: 9496-9504.:282-285 .
- **Feuillet P. (2000).** Le grain de blé (composition et utilisation), INRA ed, Paris, 308p.
- **Foltete A-S , (2010).** Effets génotoxiques et systèmes de détoxification chez *Vicia faba* (Fabaceae) dans le cadre de l'évaluation des sols pollués. Thèse de doctorat en Ecotoxicologie, Biodiversité, Ecosystèmes. Laboratoire des Interactions Écotoxicologie Biodiversité, Ecosystèmes. Université Paul Verlaine –Metz. 245p.
- **Gavriush., Lebedev., Galaktionova., Zorov. (2019).** Study of effects of metallic nanoparticles when introduced into soil on plant *Triticum vulgare*. *Earth Environ. Sci.* 341 (01): 21-68.
- **Ghafariyan, M.H., Malakouti, M.J., Dadpour, M.R., Stroeve, P., Mahmoudi, M., (2013).** Effects of magnetite nanoparticles on soybean chlorophyll. *Environ. Sci. Technol.* 47, 10645–10652.
- **Gogos A., Knauer K., Bucheli., T.D. (2012).** Nanomaterials in plant protection and fertilization: current state, foreseen applications, and research priorities. *J Agric Food Chem* 60: 9781-9792.
- **Hikosaka K.,Ishikawa K., Borjigidai A., Muller O., and Onoda Y, (2006).** Temperature acclimation of photosynthesis: mechanisms involved in the changes in temperature dependence of photosynthetic rate, *J Exp Bot*, Vol 57, 291-302.
- **Holden M. (1975).** , Chlorophylls and biochemistry, 2nd Ed, Academie press, New York, p133.
- **Issaad, G., Djebar, M.R. and Berrebbah, H. (2013)** .ROS and redox signaling in the response of stems of wheat durum to abiotic stress. *International Journal of Biosciences*3 (10): 298-305.
- **J. Yang., W. Cao., and Y. Rui .(2017),**“Interactions between nanoparticles and plants: phytotoxicity and defense mechanisms,”*Journal of Plant Interactions*, vol. 12, no. 1, pp. 158–169, 2017.
- **Jacques P, (1970).** Les céréales, pp49.
- **Karlsson H. L., Gustafsson J., Cronholm P., and Moller L. (2009).** *Toxicology Letters* 188(2), p112.

- **Khodakovskaya M., Dervishi E., Mohammad M., Xu Y., Li Z., Watanabe F., (2009).** Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano* 3:3221-3227.
- **Konate A., He X., Zhang Z., Ma Y., Zhang P., Alugongo G.M., Rui Y. (2017).** Magnetic (Fe₃O₄) nanoparticles reduce heavy metals uptake and mitigate their toxicity in wheat seedling. *Sustainability*. 9, 1-16. 395.
- **Kurtz-Chalot A. (2014).** Internalisation cellulaire et effets biologiques de nanoparticules fluorescentes de silice : Influence de la taille et de la fonctionnalisation de surface. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, France. p 143.
- **Larue, C., (2011).** Impact de nanoparticules de TiO₂ et de nanotubes de carbone sur les végétaux. Thèse pour l'obtention de grade de docteur d'Agro Paris Tech, Paris, 296p.
- **Lev-Yadun S., Gopher A., & Abbo S. (2000).** The cradle of agriculture. *Science*. Vol 288, 1602-1603.
- **Lin D, Xing B. (2007).** "Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth", *Environ Pollut*. 150, 243 -250.
- **Liu R., Lal R. (2015).** Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Sci. Total Environ*. 514, 131–139.
- **Ma X., Geisler-Lee J., Deng Y., et Kolmakov A. (2010).** Interactions entre les nanoparticules fabriquées (ENP) et les plantes: phytotoxicité, absorption et accumulation. *Sci. Total Environ*. 408, 3053-3061..
- **Mahakham W., Theerakulpisut P., Maensiri S., Phumying S., Sarmah A.K. (2016).** Environmentally benign synthesis of phytochemicals-capped gold nanoparticles as nanoprimer agent for promoting maize seed germination. *Sci. Total Environ*. 573, 1089-
- **Mazliak P. (1998).** *Physiologie végétale et croissance*, tome 2, pp. 147-148.
- **Md. Jahangir Alam., Fahmida Sultana and Md. Toufiq Iqbal. (2015).** Potential of Iron Nanoparticles to Increase Germination and Growth of Wheat Seedling. *Journal of Nanoscience with Advanced Technology*. 1(3): 14-20.
- **Meksem L. (2007).** Etude des effets de deux fongicides : Le Flammenco SC et le Tilt 250 EC sur la physiologie, la croissance et le métabolisme énergétique des racines isolées de *Triticum durum* Desf. Thèse de Doctorat, Université d'Annaba, p162 .
- **Meyer S., Reed C., Bosdeveix R. (2004).** *Botanique (Biologie et physiologie végétales)*. Ed: Maloine. 56/461.

- **Midander K., Cronholm P., Karlsson H.L., Elihn K., Moller L., Leygraf C., and Wallind I.O. (2009).** Surface characteristics, copper release, and toxicity of nano- and micrometer-sized copper and copper(II) oxide particles: a cross-disciplinary study." *Small* 5(3): 389-399.
- **Monica R.C. & Cremonini, R. (2009).** Nanoparticles and higher plants. *Caryologia*, 62: 161–165.
- **N. Thakur ., S Chrungoo., S Rana., S Kaur., S Kaur and A Pathak. (2021).** Effect Of Copper Nanoparticles On In-Vitro Seed Germination Of Wheat (*Triticum Aestivum* L.) Varieties. *Ijpsr*, Vol. 12(8): 4307-4313.
- **Nedjah, (2015).** Changements physiologiques chez des plantes (Blé dur *Triticum durum* Desf.) exposées à une pollution par un métal lourd . Thèse de doctorat : Département de biologie. Annaba. 144p.
- **Nel A., Xia T., Madler L., Li N. (2006).** Toxic potential of materials at the nano level. *Science* ; 311(5761):622-627.
- **Paparella S., Araujo S.S., Rossi G., Wijayasinghe M. (2015).** Seed priming: state of the art and 431 new perspectives. *Plant Cell Rep.* 34, 1281–1293. 432
- **Prado F.E., Boero C., Gallardo M., Gonzalez J.A.(2000).** Effect of NaCl on germination, growth and soluble sugar content in *Chenopodium quinoa* Willd. *Seeds, Botanical bulletin of Academia Sinica* 41.27-34.
- **Racuciu, m., creanga, d. & olteanu, z., (2009).** Water Based Magnetic Fluid Impact on Young Plants Growing. *Romanian Reports in Physics* 61(2): 259-268.
- **Ren H.X., Liu L., Liu C., He S–H., Huang J., Li J–L., Zhang Y., Huang X–J., Gu N. (2011).** Physiological Investigation of Magnetic Iron Oxide Nanoparticles Towards Chinese Mung Bean. *J. Biomed. Nanotechnol.* 7, 677–684.
- **Sajid M., Ilyas M., Basheer C., Tariq M., Daud M., Baig N., & Shehzad F. (2015).** Impact of nanoparticles on human and environment: review of toxicity factors, exposures, control strategies, and future prospects. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22:4122– 4143
- **Schuhata SA., Lasheem NR., Kobbro TA., Ali GH. (1999)** .Toxic effect of certain metals mixtures on some physiological and morphological characteristics of freshwater algae, *Water, air and soil pollution*, 119-135. seedling. *Sustainability*. 9, 1-16. *Science et technologie* ,(Dreier and Goring 1974) n°1, 45-53p
- **Sebastian A., Nangia A., Prasad M.N.V.(2018).** A green synthetic route to phenol fabricated magnetite nanoparticles from coconut husk extract: Implications to treat metal contaminated water and heavy metal stress in *Oryza sativa* L. *J. Clean. Prod.* 174, 355- 366.

- **Shaymurat T., Jianxiu GU., Changshan XU., Zhikun Yang., Qing Zhao, yuxue L., (2011).** Phytotoxic and genotoxic effects of ZnO nanoparticles on garlic (*Allium sativum* L.): A morphological study. Centre for Advanced Optoelectronic Functional Materials Research, Northeast Normal University, Changchun, P. R. China, EarlyOnline, *Nanotoxicology*:1-8.
- **Simon-Deckers Angélique., Loo S., Mayne-L'HermSaite M., Herlin-Boime N., Menguy N., Reynaud C., Gouget, B. &Carriere M . (2009).** Size-, Composition- and Shape-Dependent Toxicological Impact of Metal Oxide Nanoparticles and Carbon Nanotubes toward Bacteria. *Environmental Science & Technology* 43(21): 8423-8429.
- **Simonin M. (2015).** Dynamique, réactivité et écotoxicité des nanoparticules d'oxydes métalliques dans les sols : impact sur les fonctions et la diversité des communautés microbiennes. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, France, 198.
- **Soltner D. (1998).** Les grandes productions végétales : céréales, plantes sarclées, prairies. Sainte-Gemme-sur-Loire, Sciences et Techniques Agricoles.
- **Taulavuori K., Prasad M.N.V., Taulavuori E. et Laine K. (2005).** Metal stress consequences on frost hardiness of plants at northern high latitudes: A review and hypothesis. *Environ Pollut.* 135 : 209-220.
- **Théron A., (1964).** Botanique (classe de 2eM) Ed: Bordas.121-141/287.
- **Thuesombat P., Hannongbua S., Akasit S., Chadchawan S. (2014).** Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) seed germination and
- **Triboulet S. (2013).** Etude des effets de deux types de nanoparticules métalliques sur des macrophages murins par une approche protéomique. Université de Grenoble, France. p 341.
- **Woo-MI Lee., Youn-Joo AN., Hyeon Yoon., and Hee-Seok Kweon. (2008).** Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*phaseolus radiatus*) and wheat (*triticum aestivum*): plant agar test for water-insoluble nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 27, No. 9, pp. 1915– 1921.
- **Xiao X., Fan F-RF., Zhou J., & Bard A.J. (2008).** Current transients in single nanoparticle collision events. *J Am Chem Soc* 130:16669–16677.
- **Yang L., Watts D.J. (2005).** “Particle surface characteristics may play an important role in phytotoxicity of alumina nanoparticles”, *Toxicology Letters* 158, 122-132.
- **Zhu H., Han J., Xiao J.Q. & Jin Y. (2008).** Uptake, translocation and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Journal of. Environmental Monitoring*, 10: 713-717.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques
