

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد الصديق بن يحيى جيجل

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département : de Biologie Moléculaire et  
Cellulaire



كلية علوم الطبيعة و الحياة  
قسم : البيولوجيا الجزيئية و الخلوية

## Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme : **Master Académique en Sciences de  
La Nature et de la Vie**  
Filière: Sciences Biologiques

Option : Toxicologie Fondamentale et Appliquée

Thème

**Evaluation des effets des nanoparticules de  $TiO_2$   
Sur le blé (*Triticum durum*).**

### Membres de Jury Présenté par

- \*Présidente : Dr. Balli Nassima
- \*Examinatrice : Dr. Benhamada Nabila
- \*Encadrant : Dr. khen Lyes

### Présenté par

- \*Ayachi Madjda
- \*Belmehboul Meriem
- \*Dribi Naziha

Année Universitaire 2022-2023

Numéro d'ordre (bibliothèque) : .....

## ***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 Dr. Khen Lyes, 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 : Dr. Belli Nassima pour avoir accepté de présider et évaluer ce modeste travail.***

***Nous remercions vivement : Dr. Benhamada Nabila pour avoir accepté d'examiner notre travail.***

***Nous remercions vivement tous les enseignants de l'université de Mohamed seddik ben yahia.***

***Un grand merci à tous.***

## *Dédicace*

*Mes remerciements vont d'abord à Dieu*

*Je dédie ce modeste travail à mon père, le bon Cœur, le meilleur père Mahfoud, je te remercie pour tous les efforts que tu as fournis pour moi.*

*Papa merci*

*A ma maman Lakri Si tu es savais combien je t'aime, tu comprendras que sans toi je ne pourrais vivre ...*

*A mon encadreur Dr. Khen Lyes.*

*A mes chers frères Hamza, Moustafa, zidane, Mouloud, Ayoub et Younes.*

*A mes très chères sœurs Saida, Lamia, Khalida, Djahida et Ittissem qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans les moments difficiles.*

*A mes chères petites enfants Nour elyakin, Tahani, Anfel, Djoumana, Khalil, Djawad, Schayb, Ranim, Douaa, Abdjalil, Ritaje et Farah.*

*A tous les autres membres de ma famille said.*

*A mes très chers amis Rayan, Hala, Nadjeh, Meriem, safta.*

*A tous mes collègues de promotion*

*Master 2 Toxicologie*

*Madjida...*

## *Dédicace*

*À cœur vaillant rien d'impossible, Tout d'abord, je me remercie moi  
pour ma patience et Je dédie ce travail*

*À Ma très chère honorable mère Oum ssad, qui représente pour  
moi l'amour et le Symbole de la bonté par excellence,*

*À Mon cher père Amor, j'exprimer L'estime, le dévouement et le  
respect que j'ai toujours gardé pour toi.*

*À Mon merveilleux oncle Mohammad, j'espère que Dieu te  
protégera et prendra soin de toi pour nous.*

*À Mes frères : Djalal, Issam, Ahmad, Badis et Hicham qui  
a été le support, l'amour et l'enseignant spirituel pour nous, et ma  
petite sœur : Selsabil*

*Je souhaite de tout mon cœur que Dieu les gardes près de moi.*

*À Mon partenaire de vie Mohammad, merci d'être dans ma vie.*

*Nazihah...*

## *Dédicace*

*Loué soit Dieu Tout-Puissant, qui m'a accordé la volonté et la  
patience pour ce travail.*

*A ma chère mère Hafiza, source d'amour et d'affection, qui m'a  
toujours montré son sacrifice et ses bénédictions dans les moments les  
plus importants de ma vie.*

*A mon cher père Al Hashemi qui m'a toujours soutenu et aidé, a  
toujours été à mes côtés, depuis mon enfance, pour que je puisse réussir.*

*que Dieu les garde A mes, à toute ma famille*

*Pour A tous mes amis et camarades, à tous ceux qui m'aiment.*

*Tous ceux qui m'ont aidé à développer cette entreprise. ....merci pour  
tout...grâce à vous j'ai trouvé la force de me dépasser et d'aller aussi*

*loin.*

*Meriam...*

## Table des matières

### Résumés

Liste des tableaux.....I

Liste des figures..... II

Liste des abréviations.....III

Introduction générale.....I

### I. Synthèse bibliographique

1. Classification botanique *Triticum durum* Desf .....2

2. Le blé enjeux et exigence .....2

2.1. Production du blé dans le monde et en Algérie .....2

2.1.1. Dans le monde .....2

2.1.2. En Algérie .....4

2.2. Structure du grain de blé .....5

2.3. Composition biochimique de blé .....6

2.4. Cycle biologique du blé .....8

2.5. Exigence du blé.....10

3. Le stress oxydatif chez les végétaux .....12

3.1. Conséquences du stress oxydatif .....13

3.1.1. Stress biotiques .....13

3.1.2. Le stress abiotique.....13

3.2. Les espèces réactives de l'oxygène .....14

3.2.1. Les radicaux libres .....	15
3.2.2. Les radicaux superoxydes $O_2^{\bullet}$ .....	15
3.2.3. Radical hydroxyle $OH^{\bullet}$ .....	15
3.2.4. Le radical hydroperoxyde $HO_2^{\bullet}$ .....	15
3.2.5. Peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) .....	16
3.3. Source d'espèce réactive de l'oxygène dans la cellule végétale .....	16
3.3.1. Oxygène et chaîne respiratoire mitochondriale .....	16
3.3.2. NAD(P)H oxydases et autres sources cellulaires d'ERO.....	18
3.3.3. D'autres sources.....	18
3.4. Le système de défense contre le stress oxydatif chez les végétaux .....	19
3.5. Les antioxydants .....	19
4. Les nanoparticules .....	22
4.1. Les classifications des nanoparticules .....	23
4.1.1. Nanomatériaux à base de carbone.....	23
4.1.2. Nanomatériaux à base inorganique.....	24
4.1.3. Nanomatériaux organiques .....	24
4.1.4. Nanomatériaux à base de composites .....	24
4.2. Propriétés physico-chimiques des nanoparticules .....	24
4.3. Les domaines d'application des nanoparticules.....	25
4.4. Effet de la taille des nanoparticules .....	26
4.5. Cas de nanoparticule de $TiO_2$ étudiée dans ce travail.....	26

4.5.1. La définition et la forme cristalline de TiO <sub>2</sub> .....	26
4.5.2. Les effets de nanoparticules TiO <sub>2</sub> sur les végétaux .....	28

## **II. Matériel et méthodes**

1. Description du matériel biologique .....	30
2. Présentation du matériel chimique .....	30
2.1. Techniques de caractérisation.....	30
3. Protocole expérimental .....	31
3.1. La mise en culture des graines de blé .....	32
3.2. Préparation post-traitement.....	32
4. Méthodes d'analyses .....	33
4.1. Paramètres germinatifs et morphométriques.....	33
4.2. Paramètres physiologiques.....	34
4.3. Dosage de la catalase (CAT) .....	35
4.4. Analyse statistique .....	35

## **III. Résultats**

1. Impact des NPs de TiO <sub>2</sub> sur le taux de germination .....	36
2. Impact des NPs de TiO <sub>2</sub> sur la synthèse des paramètres morphométriques.....	37
a) Longueur Moyenne des Feuilles .....	37
b) Longueur Moyenne des Racines.....	38
3. Impact des nanoparticules TiO <sub>2</sub> sur la synthèse des paramètres physiologiques.....	39

a) La Teneur Relative en Eau.....	39
b) Les Pigments chlorophylliens .....	40
4. Impact des nanoparticules de TiO <sub>2</sub> sur la synthèse des paramètres enzymatiques.....	41
a)L'activité Catalase .....	41
<b>IV. Discussion.....</b>	<b>42</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>46</b>
<b>Références Bibliographique.....</b>	<b>47</b>

## Liste des tableaux

<b>N°</b>	<b>TITRES</b>	<b>PAGES</b>
<b>01</b>	Classification botanique Triticum durum Desf	<b>02</b>
<b>02</b>	Tableau récapitulatif des données relatives à la production. Consommation et stocks du marché mondial des céréales.	<b>04</b>
<b>03</b>	Composition chimique du grain de blé.	<b>07</b>
<b>04</b>	Origine et localisation des espaces réactives de l'oxygène.	<b>18</b>
<b>05</b>	Tableau récapitulant les différentes applications du TiO <sub>2</sub> .	<b>25</b>
<b>06</b>	Propriétés du TiO <sub>2</sub> rutile.	<b>27</b>

## Liste des figures

N°	TITRES	PAGES
<b>01</b>	Les cinq premiers pays producteurs du blé en 2020/2021.	<b>03</b>
<b>02</b>	Évolution de la Production et des Rendement du blé en l'Algérie (2000-2020).	<b>05</b>
<b>03</b>	Structure du grain de blé.	<b>06</b>
<b>04</b>	Cycle biologique de blé.	<b>10</b>
<b>05</b>	Différents types de facteurs de stress abiotiques chez les plantes.	<b>14</b>
<b>06</b>	Dommages cellulaires occasionnés par les ERO.	<b>16</b>
<b>07</b>	Sites de production intra-organites des formes réactives de l'oxygène (ERO) dans la cellule végétale.	<b>17</b>
<b>08</b>	Les principales enzymes antioxydantes.	<b>21</b>
<b>09</b>	Différentes formes de nanoparticules.	<b>23</b>
<b>10</b>	Situation des nanoparticules par rapport à l'échelle de taille du vivant et des technologies.	<b>26</b>
<b>11</b>	Structure cristallographiques de TiO <sub>2</sub> : (a) anatase, (b) brookite, (c) rutile.	<b>28</b>
<b>12</b>	Mécanisme d'action des nanoparticules.	<b>29</b>
<b>13</b>	Diagramme de diffractions des rayons X de nanoparticules de TiO <sub>2</sub> .	<b>31</b>

<b>14</b>	La croissance des plants de blé traités par le TiO <sub>2</sub> pendant 14 jours.	<b>33</b>
<b>15</b>	Effet des concentrations croissantes de nanoparticules de TiO <sub>2</sub> sur le taux de germination de blé dur <i>Triticum durum</i> Desf.	<b>36</b>
<b>16</b>	Effet des concentrations croissantes de nanoparticules de TiO <sub>2</sub> sur la longueur moyenne des feuilles de blé dur <i>Triticum durum</i> Desf.	<b>37</b>
<b>17</b>	Effet des concentrations croissantes de nanoparticules de TiO <sub>2</sub> sur la longueur moyenne des racines de blé tendre <i>Triticum durum</i> Desf.	<b>38</b>
<b>18</b>	Effet des concentrations croissantes de nanoparticules de TiO <sub>2</sub> sur la teneur relative en eau au niveau des feuilles de <i>Triticum durum</i> Desf.	<b>39</b>
<b>19</b>	Effet des concentrations croissantes de nanoparticules de TiO <sub>2</sub> sur la teneur des pigments photosynthétiques des plantes de blé dur <i>Triticum durum</i> Desf.	<b>40</b>
<b>20</b>	Effet des concentrations croissantes de nanoparticules de TiO <sub>2</sub> sur l'évolution de l'activité catalase au niveau des racines et des feuilles de <i>Triticum durum</i> Desf.	<b>41</b>

## Liste des abréviations

ADN : Acide désoxyribonucléique.

AOX : Alogènes organiques adsorbables.

CAT : Catalase.

CVD : Dépôt chimique en phase vapeur.

DRX : diffraction des rayons X.

ERO : Espèces réactives de l'oxygène.

FAO: Food and Agriculture Organization.

GPX : Glutathion peroxydase.

Gr : Graphène.

GR : Glutathion réductase.

GSH : Glutathion

GST : Glutathion S-transférase.

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : Peroxyde d'hydrogène.

HO<sub>2</sub><sup>•</sup>: Radical per hydroxyl.

NADH : Nicotinamide Adénine Dinucléotide.

NADPH : Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate

NM : Nanomatériaux.

NOX : Oxydes d'azote Nox.

NPs : Nanoparticules.

NTC : Nanotubes de carbone.

$O_2^{\cdot-}$ : Radical superoxide.

$OH^{\cdot}$ : Radical hydroxyl.

$ONOO^-$ : Peroxynitrite.

RH : Réponse d'hypersensibilité.

RLO : Radicaux libres dérivés de l'oxygène.

$RO^{\cdot}$  : Radical alkoxy.

$RO_2^{\cdot}$ : Radical peroxy.

SOD : Superoxyde dismutase.

$TiO_2$  : Dioxyde de titane.

TRE % : Teneur relative en eau.

UV : Ultra violet.

# **Introduction**

Depuis la révolution industrielle, l'empreinte de l'homme sur son environnement n'a cessé d'être de plus en plus importante. Les activités humaines sont en constante évolution et les procédés industriels changent avec chaque nouvelle avancée technologique (**Perreault, 2012**).

Les activités urbaines, industrielles et agricoles sont responsables d'une contamination croissante des sols et de l'eau par les ions métalliques. Les plantes sont directement exposées à ces éléments dont le potentiel toxique est indéniable. Les problèmes liés aux rejets des nanoparticules dans l'environnement et à leur transfert potentiel vers les organismes vivants, sont certainement les plus préoccupants (**Kabata-Pendias et al., 2007**).

Ce qui n'est encore que perspectives se concrétisera des années plus tard, avec les premières utilisations de nanomatériaux dans l'industrie. Ces utilisations sont encore assez limitées, il fallait attendre le début des années 2010 pour qu'une véritable explosion du développement des nanotechnologies aient lieu, (**Bour, 2015**). Ainsi, l'émergence des nanotechnologies, rendues possibles par l'évolution d'un ensemble de technologie de pointes, sont liées à l'essor actuel des secteurs de l'innovation et s'avèrent prometteuses dans différents domaines d'activités (**Canivet, 2013**). Les nanotechnologies sont en pleine expansion et de nouveaux produits contenant des nanomatériaux sont constamment mis sur le marché (Zeyons, 2008).

Concernant les végétaux ils jouent un rôle écologique important au sein des écosystèmes et sont les premiers à être exposés à des retombées atmosphériques nanoparticulaires (**Wiesner et Bottero, 2007**).

Au cours de ce travail de mémoire, nous avons choisi, d'évaluer d'un stress oxydatif, en étudiant les effets des nanoparticules dioxyde de titane sur une plante très appréciée et consommée en Algérie, et occupe la deuxième place comme source de nourriture pour les populations humaines après le riz " le blé dur". Ainsi, notre premier objectif était de mieux comprendre les réponses des plantes aux stress causés par la présence du TiO<sub>2</sub>, pour cela plusieurs points ont été analysés :

- L'impact du TiO<sub>2</sub> sur la croissance et le développement de la plante étudiée.
- L'impact du TiO<sub>2</sub> sur la perméabilité membranaire
- L'impact du TiO<sub>2</sub> sur les pigments chlorophylliens.
- Les effets du TiO<sub>2</sub> sur le métabolisme oxydant, l'analyse de cette partie a été initiée par la détermination d'un paramètre du stress oxydant, l'activité catalase.

**Synthèse**  
**Bibliographique**

## 1. Classification botanique *Triticum durum* Desf

**Tableau 1** : Classification du blé dur d'après Feillet (2000).

<b>Sous embranchement</b>	Spermaphytes
<b>Classe</b>	Monocotylédones
<b>Ordre</b>	Glumiflorales
<b>Super ordre</b>	Comméliniflorales
<b>Famille</b>	Graminae et/ou Poaceae
<b>Tribu</b>	Triticeae
<b>Sous tribu</b>	Triticinae
<b>Genre et espèce</b>	<i>Triticum durum</i> Desf.

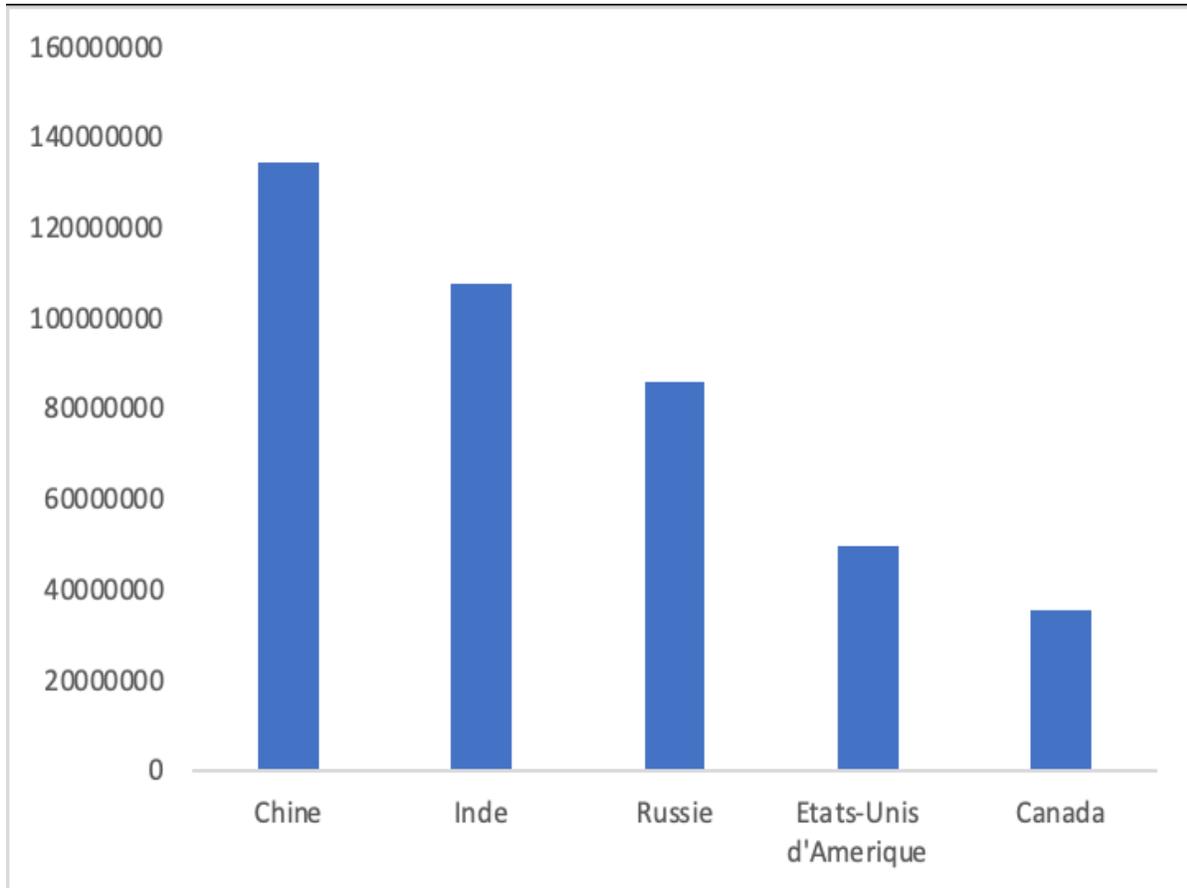
## 2. Le blé enjeux et exigence

### 2.1 Production du blé dans le monde et en Algérie

#### 2.1.1. Dans le monde

Les céréales sont les principales sources de la nutrition humaine et animale dans le monde. Le blé occupe la première place pour la production mondiale et la deuxième, après le riz, comme source de nourriture pour les populations humaines (Slama *et al.*, 2005).

Les principaux pays producteurs de blé sont la Russie, l'Ukraine, les Etats-Unis d'Amérique, la Chine, Canada, France, l'Inde, et l'Australie. Par contre les pays importateurs de blé sont les pays en voie de développement entre autres l'Algérie (FAO, 2022).



**Figure 1 :** Les Cinq premiers pays producteurs du blé en 2020/2021.(Élaboration à partir des données de FAO STAT 2022).

Selon les dernières estimations de la FAO, la production mondiale de céréales en 2022 s'est établie à 2 796 millions de tonnes, soit 0,7% de plus que l'année précédente. La production mondiale de blé devrait atteindre 775,1 millions de tonnes, soit 0,1% de moins que l'année précédente (FAO,2022).

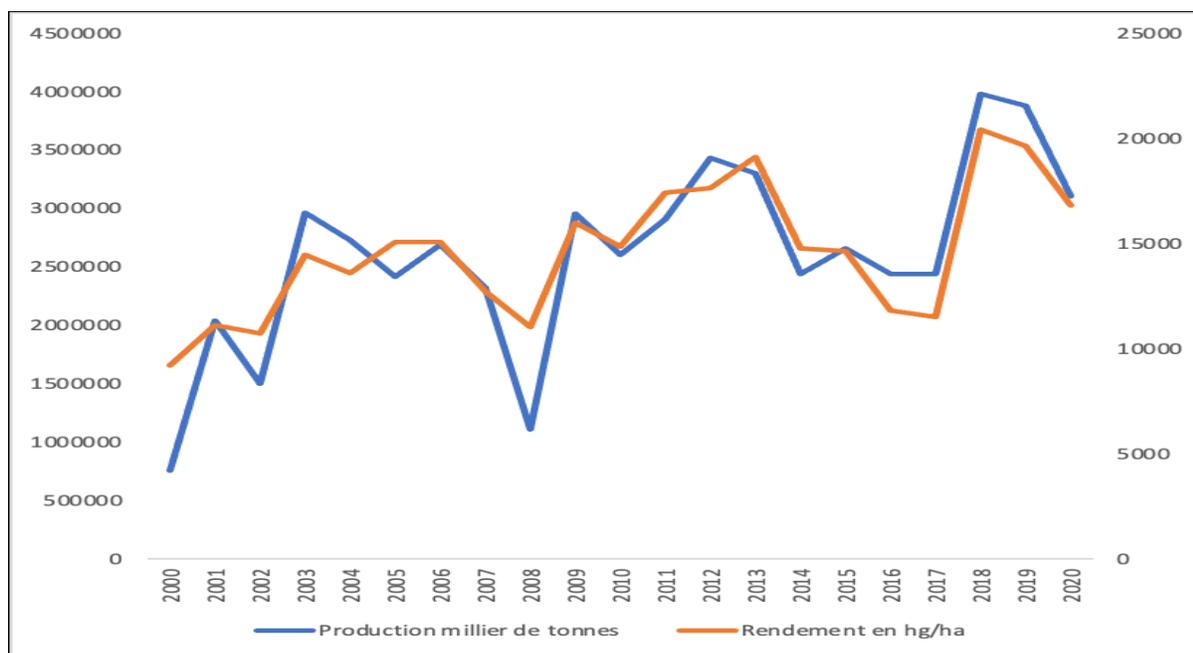
**Tableau 2 :** Tableau récapitulatif des données relatives à la production , consommation et stocks du marché mondial des céréales (FAO ,2022).

<b>Marché mondial du blé</b>						
	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22 Estimation	2022/23 Prévision <b>-Précédente</b> (3mars2023)	<b>-Dernière</b> (7avril2023)
1/ Production	731.4	759.7	775.1	778.1	794.6	796.6
2/Disponibilités	1020.4	1033.8	1059.8	1070.7	1088.4	1090.5
3/Utilisation	749.6	747.5	762.2	773.6	779.5	780.1
Commerce	169.1	183.7	189.4	195.7	197.8	199.4
4/Stocks de cloture	274.1	284.7	292.6	293.9	305.7	309.5
	Millions de tonnes	Millions de tonnes	Millions de tonnes	Millions de tonnes	Millions de tonnes	Millions de tonnes
Rapport stocks mondiaux- utilisation	36.7%	37.3%	37.8%	37.7%	38.7%	39.1%
5/Rapport stocks des principaux exportateurs- utilisation totale	18.1%	15.6%	15.2%	16.0%	18.1%	18.9%

### 2.1.2. En Algérie

En Algérie, les produits céréaliers occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale. Cette caractéristique est perçue d'une manière claire à travers toutes les phases de la filière (Djermoun, 2009).

En effet, les céréales et leurs dérivés constituent l'épine dorsale du système alimentaire algérien, 54% des apports énergétique et 62% des apports protéiques journaliers proviennent de ces produits et le blé représente 88% des céréales consommées (**Padilla et Oberti, 2000**). D'après la FAO, la production céréalière totale en Algérie en 2021 est estimée à 3,5 Mt, ce qui est inférieur au moyen quinquennal et environ 3% de moins que l'année précédente (**FAO, 2022**).



**Figure 2** : Évolution de la production et des rendement du blé en l'Algérie (2000-2020).  
(Élaboration à partir de données de FAOSTAT 2022).

### 2.2. Structure du grain de blé

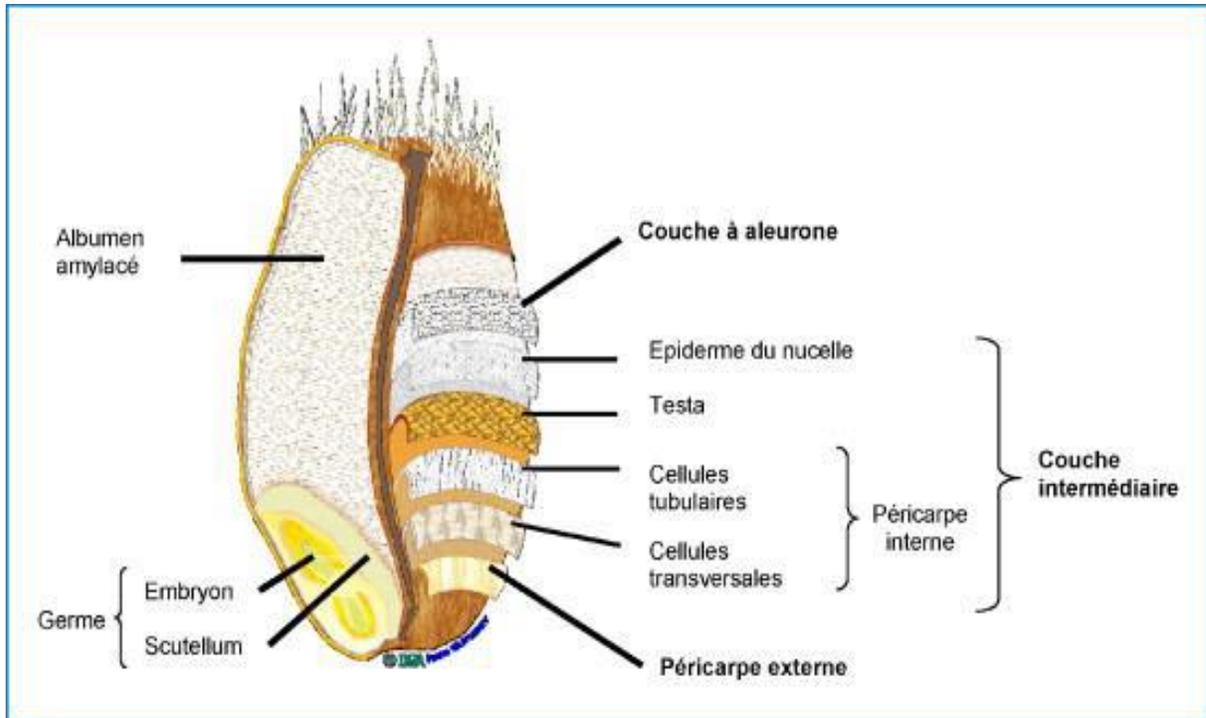
Les grains de blé sont généralement de forme ovale, bien que différents blés aient des grains allant de formes presque sphériques à des formes longues, étroites et aplaties. Le grain mesure généralement entre 5 et 9 mm de long, pèse entre 35 et 50 mg et présente un pli sur un côté où il était à l'origine relié à la fleur de blé (**Šramková, 2009**).

Le grain de blé contient :

**Le germe (2 à 3 %) :** Il représente 3% du poids du grain et il est riche en vitamines et en lipides. Il est constitué de 2 parties : l'embryon, le scutellum (**Fredot, 2005**).

**L'enveloppe** (13 à 17 %) : comprend des tissus d'origine maternelle (provenant du fruit, essentiellement l'enveloppe externe du fruit, le péricarpe, les autres tissus ayant été digérés lors du développement du grain, ce qui fait du grain de blé un caryopse (**Šramková, 2009**).

**L'endosperme farineux** (80 à 85 %) : L'albumen contient les réserves, essentiellement amylicée (**Chibani et al., 2022**).



**Figure 3** : Structure du grain de blé (**Surgetet Barron, 2005**).

### 2.3. Composition biochimique de blé

Le grain est principalement constitué d'amidon (environ 70%), de protéine (10 à 15%) selon les variétés et les conditions de culture, les autres constituants, pondéralement mineurs (quelques% seulement), sont les lipides, la cellulose, les sucres libres, les minéraux et les vitamines (**Feillet, 2000**) (**tableau 3**).

Les éléments constitutifs du grain ne sont pas uniformément répartis sur les parties du grain mais varient d'une partie à l'autre (**Feillet, 2000**).

**L'enveloppe :** (couches externes du grain de blé) est riche en vitamines B et minéraux ; il est séparé de l'endosperme amylacé lors de la première étape de broyage. Afin de protéger le grain et l'endosperme, le son comprend des fibres insolubles dans l'eau. Plus de la moitié du son est constitué de composants fibreux (53 %). Les protéines et les glucides représentent chacun 16 % de la matière sèche totale du son. La teneur en minéraux est assez élevée (7,2%) (**Shewry *et al.*, 2009**).

**Endosperme :** L'amidon est le principal composant de stockage dans l'endosperme féculent du grain de blé et les augmentations de la teneur en amidon sont largement responsables des augmentations de la taille des grains obtenues par la sélection pour produire des variétés de blé à haut rendement. L'amidon représente généralement environ 80 % du poids sec de l'endosperme féculent et comprend un mélange de deux polymères, l'amylose et l'amylopectine, dans un rapport d'environ 1,3% (**Čurná *et al.*, 2017**).

**Le germe :** se trouve à une extrémité du grain. Il est riche en protéines (25%) et en lipides (8-13%). Le taux de minéraux est également assez élevé (4,5%). Le germe de blé est disponible en tant qu'entité distincte car c'est une source importante de vitamine E. Le germe de blé ne contient que la moitié de la glutamine et de la proline de la farine, mais les niveaux d'alanine, d'arginine, d'asparagine, de glycine, de lysine et de thréonine sont le double (**Šramková *et al.*, 2009**).

**Tableau 3 :** Composition chimique du grain de blé (**Feillet, 2000**).

Nature des composants	Teneur (%ms)
Protéines	10-15
Amidon	67-71
Pentosanes	8-10
Cellulose	2-4
Sucre libre	2-3
Lipides	2-3
Matières minérales	1.5-2.5

### 2.4. Cycle biologique du blé

Le cycle est décomposé en période végétative, période reproductrice et une période de maturation (**Figure 4**). Les modifications morphologiques résultent du processus de croissance et du processus de développement (**Zegrari, 2014**).

#### 2.4.1. Période végétative

La germination commence par l'absorption d'eau (imbibition) par un grain de blé qui a perdu sa dormance post-récolte. Le développement de la plante reprend une fois que l'embryon est complètement imbibé. Avec la reprise de la croissance, la racicule et la coléoptile émergent du grain. Les trois premières racines séminales sont produites, puis la coléoptile s'allonge en poussant le point de croissance vers la surface du sol (**David Brian, 2018**).

Après la germination commence avec l'apparition de la première feuille et se termine avec l'émergence de la première talle. Jusqu'à six racines séminales et trois feuilles soutiennent la plante à ce stade. La couronne de la plante devient généralement nettement distincte après l'émergence de la troisième feuille (**David Brian, 2018**).

La formation de la couronne est bientôt suivie par l'apparition de talles et le développement d'un système racinaire secondaire ou couronne (**David Brian, 2018**).

Les nœuds à partir desquels les feuilles se développent sont au niveau de la couronne au stade du tallage. Une fois que l'articulation commence, la région entre les nœuds s'allonge, regroupe les nœuds et le point de croissance vers le haut à partir de la couronne pour produire une longue tige rigide qui portera la tête (**David Brian, 2018**).

#### 2.4.2. Période reproductrice

**A. Une phase montaison – gonflement :** La montaison débute à la fin du tallage, elle est caractérisée par l'allongement des entre nœuds et la différenciation des pièces florales.

A cette phase, un certain nombre de talles herbacées commence à régresser alors que, d'autres se trouvent couronnées par des épis.

La montaison s'achève à la fin de l'émission de la dernière feuille et des manifestations du gonflement que provoquent les épis dans la gaine (**Clementet *al.*, 1971**).

**B. Une phase épiaison – floraison :** Elle est marquée par la méiose pollinique et l'éclatement de la gaine avec l'émergence de l'épi. C'est au cours de cette phase que s'achève la formation des organes floraux (l'anthèse) et s'effectue la fécondation. Cette phase est atteinte quand 50 % des épis sont à moitié sortis de la gaine de la dernière feuille (**Gate, 1995**). Elle correspond au maximum de la croissance de la plante.

### 2.4.3. Période de maturation

**A. Stade de lait :** La formation précoce du grain se produit pendant le stade laitier. L'endosperme en développement commence par un liquide laiteux qui augmente en solides au fur et à mesure que le stade du lait progresse (**David Brian, 2018**).

**B. Étape de développement de la pâte :** La formation du noyau est achevée au cours de la phase de développement de la pâte. Le noyau accumule la majeure partie de son poids sec pendant le développement de la pâte. Le transport des nutriments des feuilles, des tiges et de l'épi vers la graine en développement est terminé à la fin du stade de la pâte dure (**David Brian, 2018**).

**C. Stade de maturation :** La graine perd de l'humidité et toute dormance qu'elle a pu avoir pendant la phase de maturation (**David Brian, 2018**).

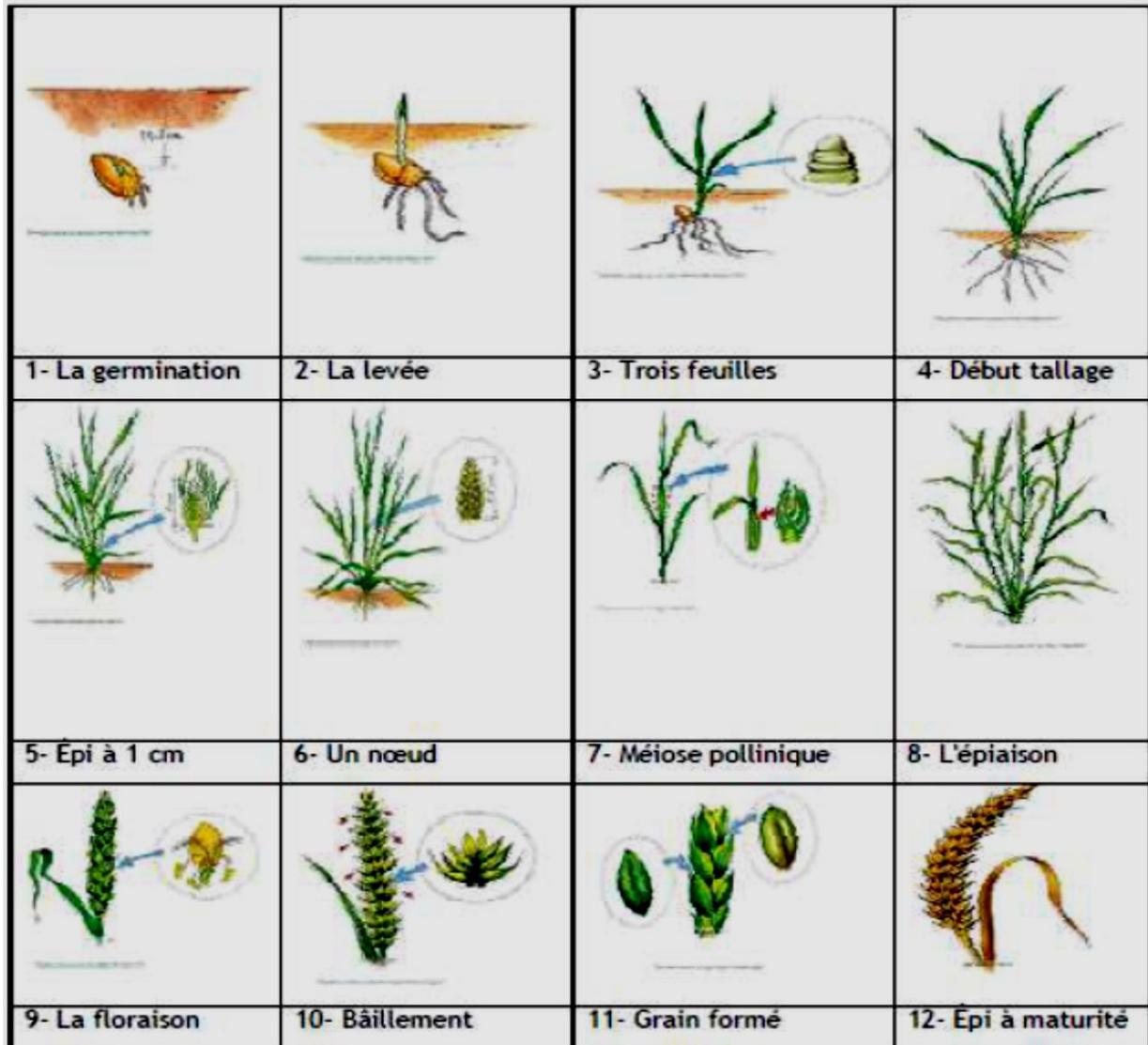


Figure 4 : Cycle biologique de blé (GefifaetOmrani, 2018).

## 2.5. Exigence du blé

### 2.5.1. Température

Elle joue un rôle dans la vitesse des réactions chimiques. A faible température, la plante est en vie ralentie, il n'y a pas de synthèse de matière organique. Lorsque la température s'élève, les réactions chimiques de la photosynthèse sont stimulées, ceci jusqu'à une valeur optimale. (Battinger, 2002).

### 2.5.2. Eau

Le blé exige une humidité permanente durant tout le cycle de développement, l'eau est demandée en quantité variable. Les besoins en eau sont estimés à environ 800mm de pluviométrie (Soltner, 2000).

En conditions de sécheresse, l'efficacité d'utilisation de l'eau est de plus de 10 mm /kg de blé dur (Ben Mbareket Boubaker, 2017).

### 2.5.3. Sol

Le blé dur exige un sol sain, drainant bien mais pas trop sujet au stress hydrique surtout pendant la période de l'accumulation des réserves dans le grain (Abdellaoui *et al.*, 2006).

Les sols qui conviennent le mieux au blé sont des sols drainés et profonds, des sols lumineux argilo-calcaires, argilo siliceux et avec des éléments fins. Du point de vue caractéristique pédologique, les blés durs sont sensibles au calcaire et à la salinité, un PH de 6,5 à 7,5 semble adéquat puisqu'il favorise l'assimilation de l'azote (OEondo, 2014).

### 2.5.4. Fertilisation

L'azote est un élément fondamental pour la croissance et le développement des céréales à paille, c'est un élément constitutif des composés organiques azotés comme les protéines, les vitamines et la chlorophylle. Lorsque l'alimentation azotée est perturbée, les plants sont chétifs, le tallage est faible, les rendements diminuent et la teneur en protéines du grain est réduite (Allaoui,2005 ;Aitabdallah *et al.*, 2014).

### 2.5.5. Lumière

La lumière est la source d'énergie qui permet à la plante de décomposer le CO<sub>2</sub> atmosphérique pour en assimiler le carbone et réaliser la photosynthèse des glucides. La lumière est donc un facteur climatique essentiel et nécessaire pour la photosynthèse (Hacini, 2014), Le bon tallage est

garanti, si le blé est placé dans les conditions optimales d'éclairage, dont dépendent à la fois la résistance des tiges à la verse et le rendement (**Lebachiche et Benkadja, 2019**).

### 3. Le stress oxydatif chez les végétaux

L'environnement est constitué d'un ensemble de relations entre les êtres vivants et non vivants et est parfaitement équilibré par divers processus naturels. Chaque espèce influence son environnement et, à son tour, est influencée par lui. En général, de nombreux facteurs environnementaux, notamment la salinité, la sécheresse, les températures extrêmes, la toxicité des métaux, les polluants atmosphériques, la lumière ultraviolette (**Choudhury, 2013**), et des doses élevées de pesticides ainsi que des infections par des agents pathogènes peuvent entraîner un stress oxydatif chez les plantes (**Limón Pacheco, 2017**).

Pratiquement tous les stress environnementaux et biotiques déclenchent une réponse de stress généralisée appelée stress oxydatif qui peut endommager les composants cellulaires et provoquer leur dysfonctionnement. Ceci est induit par la surproduction et l'accumulation de molécules contenant de l'oxygène activé et appelées « espèces réactives de l'oxygène » (ERO).

Les raisons à l'origine d'un stress oxydatif comprennent principalement : (1) un déséquilibre entre la génération de ERO et la détoxification en raison d'une perturbation de la physiologie cellulaire « normale » ; (2) La biosynthèse de niveau des ERO en tant que partie constitutive de la signalisation du stress et de la réponse immunitaire nécessaire à la défense et à l'adaptation. Ces mécanismes coexistent, car des facteurs de stress produisant directement des ERO (métaux de transition, ultraviolets ou ozone) stimulent en outre la génération de ERO par les NADPH oxydases et les peroxydases (**Demidchik, 2015**).

Les stress environnementaux affectent négativement la croissance des plantes, le développement et la productivité des cultures. Ces conditions défavorables modifient le métabolisme des espèces réactives de l'oxygène et de l'azote, les concentrations élevées de ces espèces réactives qui dépassent la capacité des enzymes de défense antioxydantes, perturbent l'homéostasie redox, ce qui pourrait déclencher des dommages aux macromolécules, telles que les lipides membranaires, les protéines et les acides nucléiques, et entraîner à terme un stress nitroxydatif et la mort des cellules végétales (**Chakiet al., 2020**).

### 3.1. Conséquences du stress oxydatif

Les conditions de stress environnemental telles que la sécheresse, la chaleur, la salinité, le froid ou l'infection par des agents pathogènes peuvent avoir un impact dévastateur sur la croissance et le rendement des plantes dans les conditions de terrain. Néanmoins, les effets de ces stress sur les plantes sont généralement étudiés dans des conditions de croissance contrôlées en laboratoire. L'environnement sur le terrain est très différent des conditions contrôlées utilisées dans les études en laboratoire et implique souvent l'exposition simultanée des plantes à plus d'une condition de stress abiotique et/ou biotique, comme une combinaison de sécheresse et de chaleur, de sécheresse et de froid, de salinité et de la chaleur, ou l'un des principaux stress abiotiques combinés à une infection pathogène (**Gull *et al.*, 2019**).

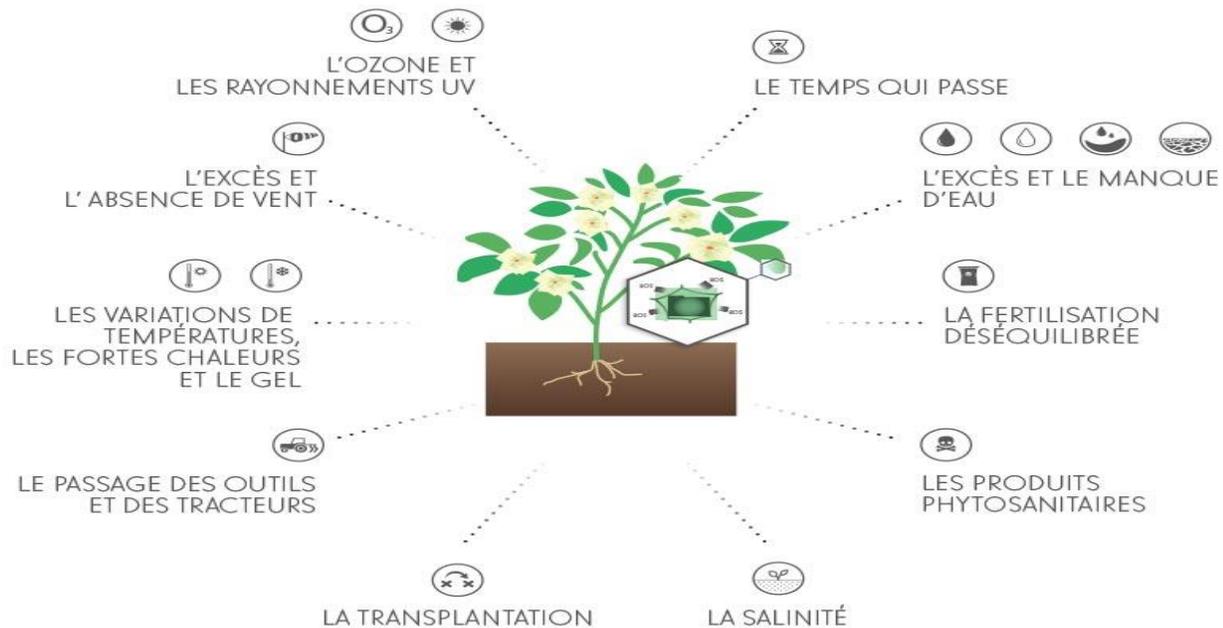
#### 3.1.1. Stress biotiques

Les facteurs biotiques caractérisent l'ensemble des influences qu'exercent les êtres vivants entre eux et sur leur milieu (**Ramade, 2003**). Les réponses de défense à ces phytopathogènes incluent la génération des (ERO), une réponse d'hypersensibilité (RH) au niveau du site d'infection, une variation dans la composition de la paroi cellulaire, inhibant l'entrée d'agents pathogènes.

#### 3.1.2. Le stress abiotique

La plupart des cultures cultivées en plein champ sont fréquemment exposées à divers stress. La nature complexe de l'environnement, ainsi que ses conditions imprévisibles et le changement climatique mondial, augmentent progressivement, ce qui crée une situation plus défavorable (**Mittler *et al.*, 2010**). Un certain nombre de conditions environnementales anormales sont appelés stress abiotique (**Figure05**) les stress modifient le métabolisme des plantes entraînant des effets néfastes sur la croissance, le développement et la productivité. Si le stress devient très élevé et/ou se poursuit pendant une période prolongée, il peut entraîner une charge métabolique intolérable sur les cellules, réduisant et dans les cas graves, entraîner la mort de la plante. Cependant, le stress des plantes peut varier en fonction des types d'agents stressants et de la période prédominante. Certains

facteurs environnementaux, comme l'air et la température, peuvent devenir stressants en quelques minutes seulement ; d'autres, comme l'eau du sol contenu, peut prendre des jours à des semaines, et des facteurs tels que les carences en minéraux du sol peuvent mettre des mois à devenir stressants (Taizet *al.*, 2006).



**Figure 5** : Différents types de facteurs de stress abiotiques chez les plantes.

### 3.2. Les espèces réactives de l'oxygène

Les ERO ont longtemps été considérées comme des sous-produits toxiques du métabolisme normal de l'oxygène et impliquées dans de nombreuses pathologies (Migdalet *al.*, 2011), ils sont présents dans la cellule à des doses raisonnables : leur concentration est régulée par l'équilibre entre leur taux de production et leur taux d'élimination par les systèmes antioxydants (Halliwell, 1989).

Les plantes utilisent l'oxygène, via le métabolisme aérobie, pour fournir l'énergie nécessaire à leur croissance et à leur développement. Cependant, la réduction de l'oxygène par les cytochromes de la chaîne respiratoire s'accompagne inévitablement d'une production de radicaux oxygénés (Claire *et al.*, 2008).

Les ERO sont impliquées dans le développement de divers effets, et dans la signalisation lors de la réponse des plantes aux stress. Le rôle prépondérant des ERO dans l'initiation et l'exécution de la mort cellulaire a déjà été démontré pour de nombreux processus du développement végétal comme la germination (**Parent *et al.*, 2008**).

### 3.2.1. Les radicaux libres

Un radical libre est une espèce chimique possédant un électron célibataire (non apparié) tel que les radicaux libres oxygénés ( $O_2^{\cdot -}$  : radical superoxyde  $\cdot HO_2$  : radical perhydroxyle  $\cdot OH$  : radical hydroxyle  $\cdot RO_2$  : radical peroxy  $\cdot RO$  : radical alkoxy) (**Gardès-Albert *et al.*, 2003**).

### 3.2.2. Les radicaux superoxydes $O_2^{\cdot -}$

Le radical superoxyde  $O_2^{\cdot -}$  est un radical libre responsable de dégrader des contaminants organiques. Il est connu pour être un réducteur faible (**Frimer, 1988**). Il a été démontré que cet anion est très réactif lorsque la concentration en peroxyde d'hydrogène est élevée (Smith *et al.*, 2004). Le radical  $O_2^{\cdot -}$  a une durée de vie de l'ordre de quelques secondes, qui lui permet de diffuser au-delà de son lieu de production pour atteindre ses cibles (**Claire *et al.*, 2008**).

Enfin, l'anion superoxyde peut être le produit de l'auto-oxydation de divers composés biologiques (neuromédiateurs, thiols ou co-enzymes réduits) (**Halliwell *et Gutteridge*, 2015**).

### 3.2.3. Radical hydroxyle $\cdot OH$

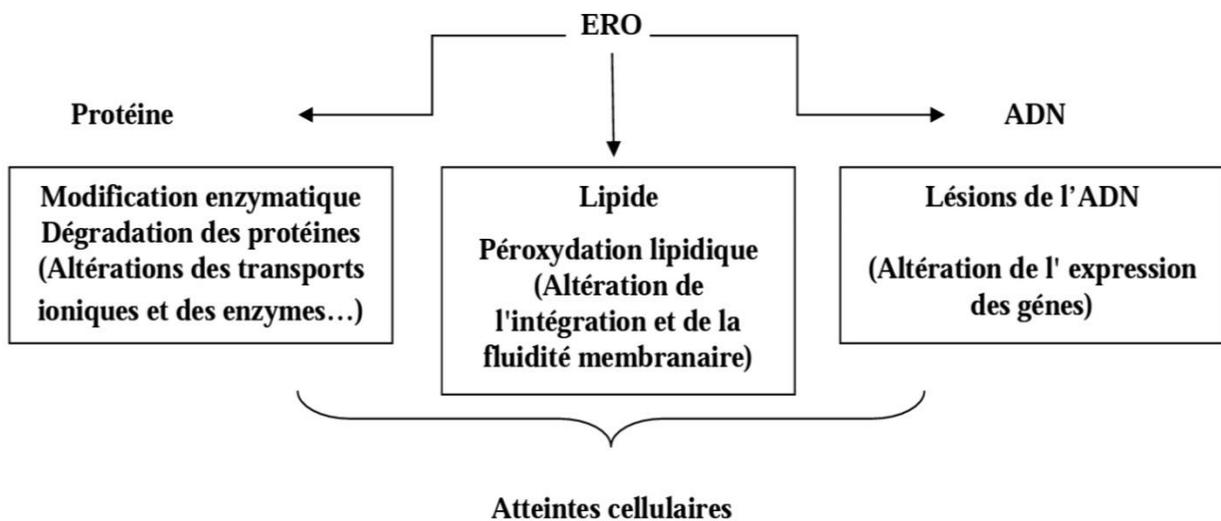
Le radical hydroxyle est l'oxydant par excellence présent dans la nature lors de réaction de Fenton. Ce radical réagit fortement avec une large variété de composés organiques et non organiques (**Siegristet *al.*, 2011**).

### 3.2.4. Le radical hydroperoxyde $\cdot HO_2$

Le radical hydroperoxyde  $\cdot HO_2$  est considéré comme un faible oxydant et se forme à pH acide (**Watts *et Teel.*, 2006**). L'anion hydroperoxyde  $HO_2^-$  est considéré comme un nucléophile puissant qui réagit avec des contaminants à pH faible à modéré (**Siegristet *al.*, 2011**).

### 3.2.5. Peroxyde d'hydrogène(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

Le peroxyde d'hydrogène H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, également appelée dioxyde d'hydrogène ou eau oxygénée est très soluble dans l'eau, pénètre facilement les membranes biologiques et peut provoquer la dégradation des protéines, la libération de Fe<sup>3+</sup> ; l'oxydation de l'ADN, de lipides, ou encore de thiols, mais également l'inactivation d'enzymes. Sa capacité à traverser les membranes biologiques, fait du peroxyde d'hydrogène un des composant utilisé par les cellules dans la signalisation intra et/ou intercellulaire. En effet, en faible concentration, il ne présente pas de toxicité pour la cellule. Cependant, en forte concentration, il induit une cytotoxicité par le biais des ERO qu'il génère. En se décomposant en anions hydroxyles et en radicaux hydroxyles par la réaction de fenton en présence de sels métalliques (Fe<sup>2+</sup> et Cu<sup>+</sup>), il devient toxique (wardman *et candeias*, 1996).



**Figure 6 :** Dommage cellulaire occasionnés par les ERO (Belgacem et Charef,2018).

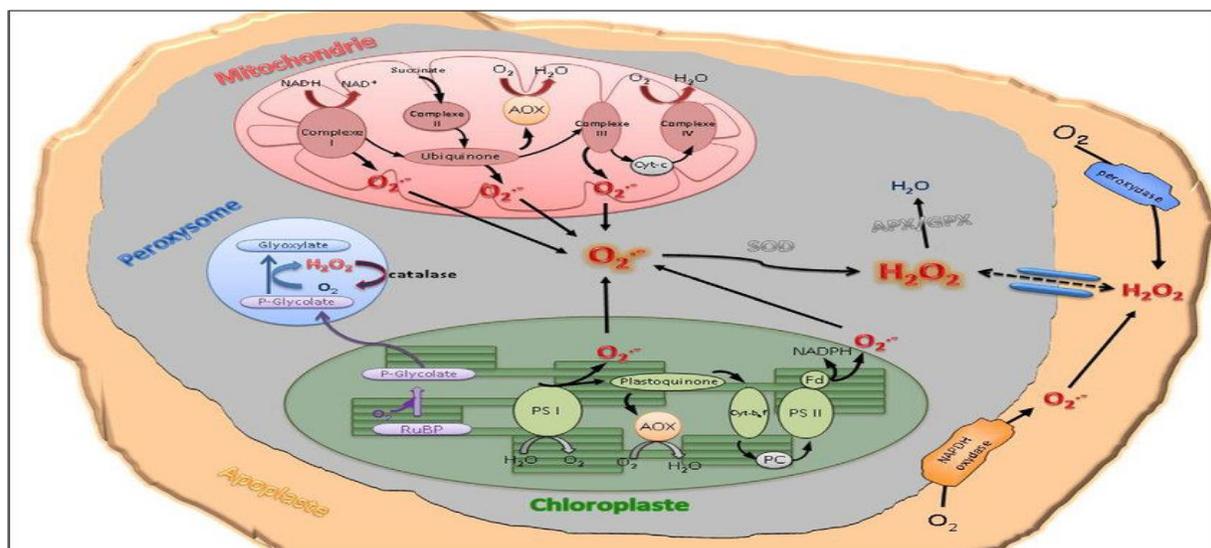
## 3.3. Source d'espèce réactive de l'oxygène dans la cellule végétale

### 3.3.1. Oxygène et chaîne respiratoire mitochondriale

La production de formes réactives de l'oxygène est une réponse cellulaire commune à de nombreux stress chez les végétaux qui se localise au niveau de différentes sources notamment, selon qu'il s'agisse d'un stress d'origine biotique ou abiotique (Dat *et al.*,2000 ; VanBreusegem *et*

*al.*,2006). Chez les animaux, les mitochondries constituent la source principale de ERO. Chez les plantes, la production de ERO par les mitochondries a été historiquement minimisée par rapport à celle des chloroplastes. Cependant, avec l'identification de l'alternative oxydase (AOX), la mitochondrie pourrait devenir un acteur important dans la régulation du stress oxydatif chez les plantes (Maxwell *et al.*, 1999 ;Vidalet *al.*, 2007). En effet, cette enzyme agit comme une « soupape de sécurité », contrôlant la réduction du pool d'ubiquinone, source importante de ERO (Rhoadset *al.*, 2007). Pour cette raison, la mitochondrie a été proposée comme médiateur entre les changements métaboliques, la production de ERO et l'induction de gènes. Cependant, la contribution de la mitochondrie à la production de ERO lors de la réponse au stress reste encore mal définie. Dans la plupart des situations où les conditions environnementales sont modifiées, une forte augmentation de la production des ROS est observée au niveau des chloroplastes (Figure 07) (Noctoret *al.*, 1998 ;Datet *al.*,2000 ;Mittler,2002).

Lors du métabolisme normal, la réduction tétravalente de l'oxygène en eau se fait en plusieurs étapes successives qui donnent naissance à des ERO. Ainsi, environ 2 % de l'oxygène consommé au niveau mitochondrial sont transformés en radicaux superoxydes  $O_2^{\cdot-}$  lors de la première réduction électronique de l'oxygène (Migdalet *al.*, 2011).



**Figure 7 :** Sites de production intra-organites des formes réactives de l'oxygène (ERO) dans la cellule végétale (Claire *et al*, 2008).

### 3.3.2. NAD(P)H oxydases et autres sources cellulaires d'ERO

La plupart des cellules sont capables de produire des radicaux superoxydes  $O_2^{\cdot-}$  via une activité NAD(P)H oxydase membranaire (NOX). La NOX est une enzyme qui catalyse la réduction monoélectronique de l' $O_2$  en utilisant le NADPH ou le NADH comme donneur d'électrons (Guichard *et al.*,2006).

### 3.3.3. Autres sources

Elle peut être cytosolique ou présentes au sein de différents organites, peuvent produire des ERO.

Par exemple, la xanthine oxydase, qui catalyse l'oxydation de l'hypoxanthine et de la xanthine au cours du métabolisme des purines, entraîne la formation d' $O_2^{\cdot-}$ . Les enzymes du réticulum endoplasmique, dont la famille des cytochromes P450, assurent l'oxydation des acides gras insaturés (et de certains xénobiotiques) et réduisent l'oxygène moléculaire pour former  $O_2^{\cdot-}$  et/ou  $H_2O_2$ . Les enzymes de la voie de l'acide arachidonique, les peroxyosomes, les lysosomes (qui contiennent la myéloperoxydase responsable de la formation d'acide hypochloreux) et le noyau (qui possède des cytochromes oxydases et une chaîne de transport d'électrons) sont également capables de produire  $O_2^{\cdot-}$  (Delattre *et al.*, 2005).

**Tableau 4 :** Origine et localisation des espaces réactives de l'oxygène (smirnoff, 1998).

Origine	Localisation	ERO
Photosynthèse, PS I ou PS II	Chloroplaste	$O_2^{\cdot-}$
Respiration (transport d'électrons)	Mitochondrie	$O_2^{\cdot-}$
Glycolate oxydase	Peroxyosome	$H_2O_2$
Ghlorophylles excitées	Chloroplaste	$O_2^{\cdot-}$
NADPH oxydase	Membrane cellulaire	$O_2^{\cdot-}$

$\beta$ -oxydation des acide gras	Peroxisome	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Oxalate oxydase	Apoplaste	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Xanthine oxydase	Peroxisome	O <sub>2</sub> <sup>•</sup>
Peroxydases, Mn <sup>2+</sup> et NADH	Membrane cellulaire	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Amine oxydase	Apoplaste	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> <sup>•</sup>

### 3.4. Le système de défense contre le stress oxydatif chez les végétaux

La production physiologique d'ERO est régulée par des systèmes de défense composés d'enzymes superoxyde dismutases (SODs), catalase, glutathion peroxydases (GPx's), couple thiorédoxine/thiorédoxine réductase, hème oxygénase, peroxyrédoxine...), de molécules antioxydantes de petite taille (caroténoïdes, vitamines C et E, glutathion, acide urique, bilirubine, acide lipoïque, ubiquinone, ...) et de protéines (transferrine, ferritine, céruléoplasmine) qui maintiennent les métaux de transition (**Pincemilet *al.*, 2002**).

Pour empêcher les dommages cellulaires, ou les limiter, les organismes ont développé des systèmes de défense antioxydants très complexes faisant intervenir des espèces enzymatiques et non-enzymatiques (**Béguel, 2012**).

### 3.5. Les antioxydants

Les antioxydants au sens large représentent l'ensemble des molécules susceptibles d'inhiber la production, de limiter la propagation ou de détruire les ERO (**sieset *al.*, 1997**) ces antioxydants peuvent agir en réduisant ou en dismutant ces espèces, en les piégeant pour former un composé stable. Une fois les taux des ERO revenu à la normale, les systèmes enzymatiques interviennent et permettent la réparation (**Garrelet *al.*, 2007**).

Il existe deux types d'antioxydants :

Les antioxydants primaires ou radicalaires ou vrais : qui permettent l'interruption de la chaîne autocatalytique :  $AH + R^{\bullet} \rightarrow A^{\bullet} + RH$ . La molécule AH est antioxydante si le radical formé  $A^{\bullet}$  est plus stable. La stabilité du radical  $A^{\bullet}$  peut s'expliquer par sa conversion en composés non radicalaires.

Les antioxydants secondaires ou préventifs : qui assurent l'inhibition de la production des radicaux libres. Ce sont des substances décomposant les hydroperoxydes en alcool, des thiols (glutathion, acides aminés soufrés) ou les disulfures, des protecteurs vis-à-vis des UV, comme les carotènes, des chélatants des métaux promoteurs d'oxydation type fer et cuivre, comme l'acide citrique et les lécithines) ou enfin de séquestrant d'oxygène comme l'acide ascorbique (**Rolland, 2004**).

### 3.5.1. Le système de défense antioxydant enzymatique

Les principales enzymes antioxydantes sont la superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT), la glutathion peroxydase (GPX), la glutathion réductase (GR) et la glutathion S-transférase (GST)(**Hermes-Lima, 2005**).

#### A. La superoxyde dismutase (SOD)

Le superoxyde dismutase (SOD) est une enzyme antioxydante fonctionnelle pour les stratégies de défense physiologique chez les animaux et les plantes contre les radicaux libres et les espèces réactives de l'oxygène générés par le stress biotique et abiotique(**Stephenie,2020**).

Catalyse la dismutation de l'anion superoxyde ( $O_2^{\bullet-}$ ) pour former  $H_2O_2$  et  $O_2$ . Cette enzyme est considérée comme l'un des principaux systèmes enzymatiques pour piéger les radicaux libres générés par le stress  $O_2^{\bullet-}$  dans les plantes (**Pan et al.,1992**). D'autres enzymes, telles que la CAT et le POX, agissent en étroite synchronisation avec la SOD pour empêcher la formation de ERO plus nocifs par  $O_2^{\bullet-}$  et  $H_2O_2$  via une réaction de Haber-Weiss.

Selon les cofacteurs métalliques (tels que Cu, Zn, Mn, Fe et Ni) qui sont associés à la SOD, elle a différentes isoformes, telles que Cu/Zn-SOD, Mn-SOD et Fe-SOD (**Fink et al.,2002**).L'isoforme Cu/Zn-SOD présente dans le cytoplasme, les peroxysomes, le chloroplaste et au niveau extracellulaire (apoplaste) et Fe-SOD dans le chloroplaste des plantes, tandis que Mn-SOD se trouve dans la matrice des mitochondries et dans les peroxysomes (**Stephenieet al.,2020**).



### 3.5.2. Le système de défense antioxydant non enzymatique

Les principaux antioxydants non-enzymatiques sont le glutathion, la vitamine E, la vitamine C, les caroténoïdes et l'acide urique. Ces molécules vont interrompre la chaîne de réaction radicalaire (Cadenas, 1989).

**A. La vitamine E :** La vitamine E ou  $\alpha$ -tocophérol, est le principal antioxydant membranaire fixée aux membranes lipidiques, elle a pour rôle de stopper les réactions en chaîne de lipoperoxydation. Elle est alors elle-même oxydée, mais sa réactivité est bien moindre, ce qui permet aux systèmes antioxydants de la réduire (Cornejo-Garcia *et al.* 2006).

**B. La vitamine C :** La vitamine C ou acide ascorbique, est un agent antioxydant majeur. Elle est hydrophile, thermosensible et photo labile. Elle a également la capacité de s'oxyder extrêmement rapidement au contact des radicaux libres. Elle peut aussi régénérer la vitamine E oxydée dans les lipides membranaires et joue donc un rôle très important dans l'inhibition de la propagation de la peroxydation lipidique. Une fois oxydée, elle peut être régénérée par le glutathion peroxydase, qui utilise alors le GSH pour la réduire à nouveau. En présence de cuivre ou de fer, elle favorise la formation de radical hydroxyle et a donc un effet pro-oxydant (Poinso, 2016).

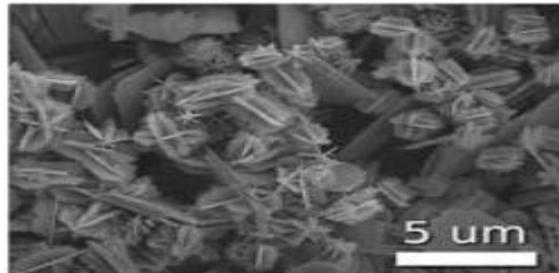
### 4. Les nanoparticules

Les nanoparticules (NP) sont des structures comprenant de quelques centaines à quelques milliers d'atomes. De par leur taille (1 à 100 nanomètres), les propriétés physiques et chimiques de ces nano-objets diffèrent de celles des matériaux classiques. Elles couvrent un large domaine de développement, tel que l'industrie, l'agriculture, la recherche médicale, l'électronique, le textile, la cosmétique, ou comme catalyseurs (Bouzar, 2017).

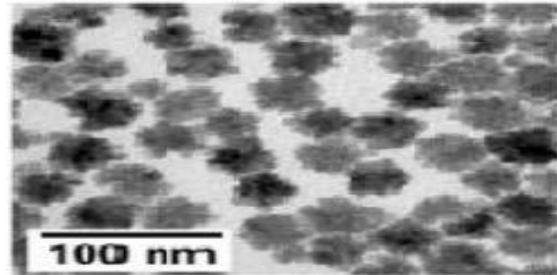
Elles peuvent être classées en deux grands groupes, les NP organiques (liposomes, NP polymères, nanotubes de carbone, fullerènes) et les NP inorganiques (boîtes quantiques, NP magnétiques, sondes Raman) (Chuto, 2010).

### 4.1. La classification des nanoparticules

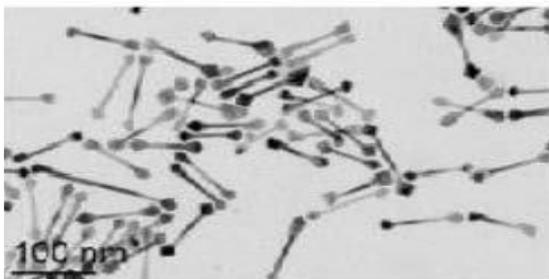
Les nanoparticules (NP) sont principalement classées en différentes classes en fonction de leur morphologie, de leur taille, de leurs propriétés physiques et chimiques. Ils sont principalement classés en NP organiques, inorganiques et carbonées (**Figure 9**).



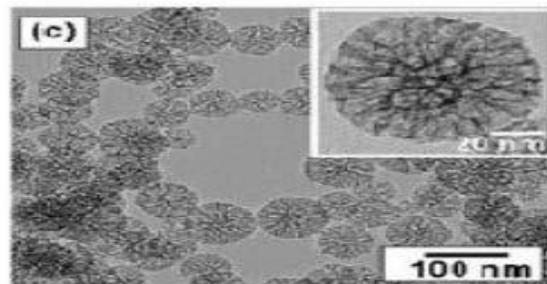
Nanocristaux étoilés  
d'oxyde de vanadium



Nanoparticules d'oxyde de fer



Nanobâtonnets de Co  
avec des extrémités de Fe



Nanoparticule de Silice

**Figure 9** : Différentes formes de nanoparticules (**Badri, 2018**).

#### 4.1.1. Nanomatériaux à base de carbone

Généralement, ces NM contiennent du carbone, et se retrouvent dans des morphologies telles que les tubes creux, ellipsoïdes ou sphères, fullerènes (C<sub>60</sub>), nanotubes de carbone (NTC), nanofibres de carbone, graphène (Gr) et les oignons de carbone sont inclus dans la catégorie des NM à base de carbone. Parmi les principales méthodes de production de ces éléments, il y'a l'ablation laser, la décharge d'arc et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) (**Jeevanandamet al.,2018**).

### 4.1.2. Nanomatériaux à base inorganique

Les nanoparticules dépourvues d'atomes de carbone sont appelées nanoparticules inorganiques. Ces nanoparticules sont généralement définies comme celles composées de métaux ou d'oxydes métalliques (**Khan *et al.*, 2022**).

### 4.1.3. Nanomatériaux organiques

Les nanoparticules organiques sont des particules solides composées de composés organiques tels que des lipides ou des polymères d'un diamètre compris entre 10 nm et 1  $\mu\text{m}$  (**Khan, 2019 ;Ealia, 2019 ;Khalisannet *al.*, 2020**), Certaines NP organiques communément connues sont les dendromères, les liposomes, les micelles, la ferritine, etc. Ces NP organiques sont respectueuses de l'environnement, biodégradables, et plus adaptées au domaine biomédical, les micelles comme les liposomes ont un noyau creux, également appelé nanocapsules. Ces propriétés uniques font des NP organiques un choix idéal pour l'administration de médicaments. Ils sont très efficaces dans l'administration de médicaments ciblés (**Kumari *et al.*, 2021**).

### 4.1.4. Nanomatériaux à base de composites

Les nanomatériaux composites sont multi phases NPs et NMs avec une phase sur la dimension nanométrique qui peuvent combiner des NP avec d'autres NP ou des NP combinés avec des matériaux plus gros ou en vrac (par exemple, hybride nanofibres) ou des structures plus compliquées, comme un organométallique cadres. Les composites peuvent être n'importe quelles combinaisons de NM à base de carbone, à base de métal ou à base organique avec sous forme de matériaux en vrac métalliques, céramiques ou polymères. Les NM sont synthétisés dans différentes morphologies (**Ostiguy *et al.*,2006**).

## 4.2. Les propriétés physico-chimiques des nanoparticules

Les nanoparticules démontrent des propriétés qui diffèrent des matériaux en vrac desquels ils proviennent. En général, l'intégration de nanoparticules visera la modification de leurs propriétés électriques, mécaniques, magnétiques, optiques ou chimiques (**Ostiguy *et al.*,2006**).

La détermination des propriétés physico-chimiques des NPs est nécessaire avant toute utilisation pour les différentes études toxicologiques. Elle concerne aussi bien les propriétés

intrinsèques des NPs, que leur mode de préparation, de purification, de dispersion (**Triboulet, 2013**). En raison de leur taille nanométrique, les nanomatériaux possèdent des propriétés physico-chimiques différentes de même matériaux de plus grande taille se qui leur confèrent un grand rapport surface/volume et donc une proportion importante d'atomes exposés en surface (**Yahyaoui, 2021**).

En effet, plus les particules sont petites, plus le rapport surface/volume est élevé « i.e. augmentation de la surface d'échange disponible pour un même matériau », et plus le matériau est réactif (**Haruta,1997 ;Auffanet al., 2009**). Cependant, les propriétés des nanoparticules sont très diverses et recherchées par les industriels de nombreux secteurs de peintures, composants électroniques, cosmétiques...etc (**Foltete, 2010**).

### 4.3. Les domaines d'application des nanoparticules

De nos jours, de plus en plus, les nanoparticules sont utilisées dans différents domaines, et cela grâce à leurs propriétés particulières. Entre autres : la médecine, cosmétique, électronique, automobiles, etc (**Tableau5**).

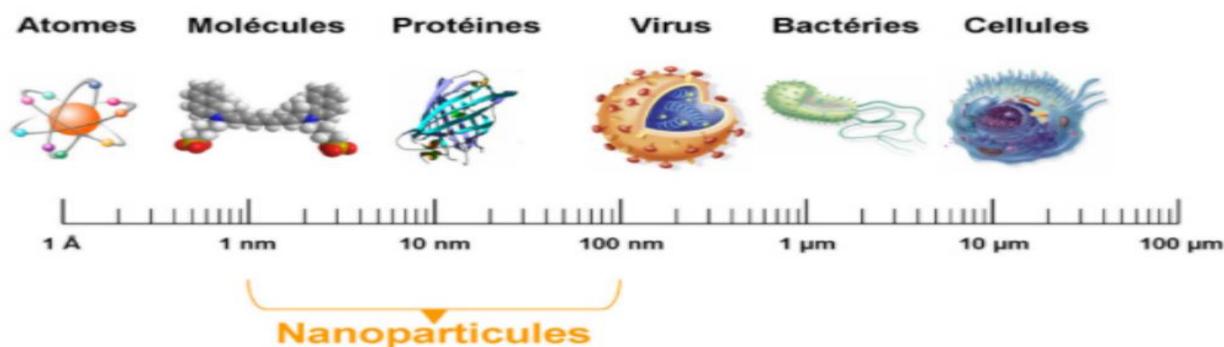
**Tableau 05 :** Tableau récapitulant les différentes applications des TiO<sub>2</sub> (**Auffan, 2007**).

Domaine	Application	Propriétés
<b>Environnement</b>	Papier peint, peinture, enduits, rideaux, abat-jour de fenêtre, ciment, vitres, tuiles, murs de tunnel, lampes de tunnels, murs insonorisés, purificateur d'air, désinfection des eaux usagées.	Autonettoyant, antibactérien, purification de l'air et de l'eau.
<b>Médical</b>	Carrelage, murs des salles d'opérations.	Antibactérien, stérilisation, autonettoyant.
<b>Energie</b>	Cellules solaires, production d'hydrogène.	Conversion de l'énergie solaire, hydrolyse de l'eau.

### 4.4. Effet de la taille des nanoparticules

A l'échelle macroscopique, l'extension de la particule est supposée infinie. Donc, l'effet des extrémités n'influe pas sur le mouvement des électrons, mais lorsque la taille de la particule est réduite à l'échelle nanométrique, l'électron est influencé par le changement d'échelle (**Klaine *et al.*, 2012**). En effet, de par sa nature duale onde-corpuscule, l'électron est fortement sensible à la taille du solide dans lequel il bouge. Ainsi, les conditions limites supposant l'infinie de taille seront invalides dans ce cas (**Krahneet *al.*, 2011**).

De plus, la taille des NPs affecte directement leur comportement, leur transport et leur devenir dans l'environnement mais augmente aussi leur biodisponibilité vis-à-vis des barrières biologiques, qu'elles peuvent atteindre plus facilement que les particules de plus grandes tailles. Les propriétés d'adsorption, de dissolution, et d'oxydo-réduction des particules sont liées à la taille de ces particules. Les NPs peuvent rester en suspension dans l'air et l'eau et se déplacer sur de grandes distances constituant également des vecteurs pour d'autres contaminants (**Yahyaoui, 2021**).



**Figure 10** : Situation des nanoparticules par rapport à l'échelle de taille du vivant et des technologies (**Kurtz-chalot, 2014**).

### 4.5. Cas de nanoparticule de $\text{TiO}_2$ étudiée dans ce travail

#### 4.5.1. Définition et forme cristalline de $\text{TiO}_2$

Le titane (Ti) est un métal qui représente la quatrième structure métallique la plus abondante dans la croûte terrestre (~ 0,5%), Le dioxyde de titane représente 70 % du volume total de la production mondiale de pigment, il est largement utilisé comme agent blanchissant et opacifiant

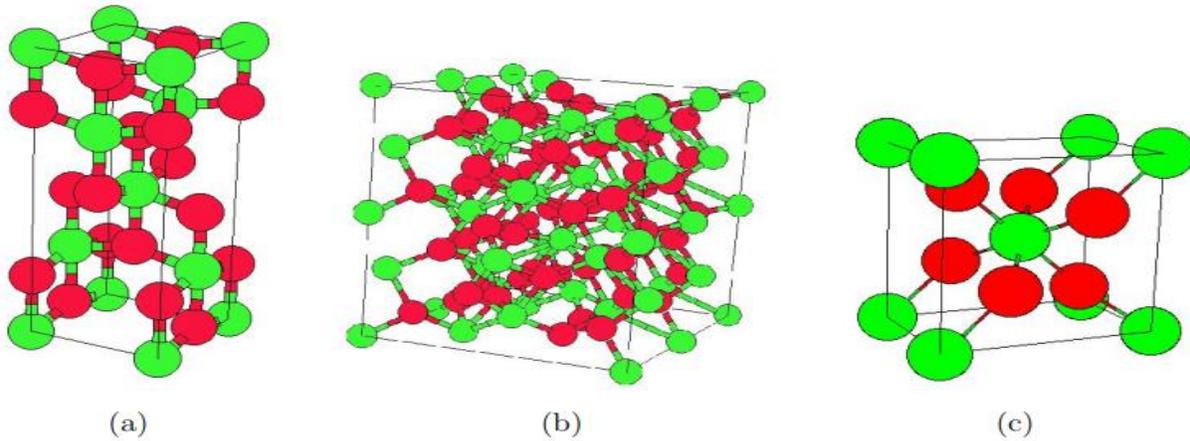
dans les produits tels que la peinture, le plastique, le papier, l'encre, les aliments...etc (Nezzari,2020).

**Tableau 6 : Propriétés du TiO<sub>2</sub> rutile (Belkacemi, 2011).**

Caractérisations	Spécifications
Catégorie	Minéral
Formule brute	TiO <sub>2</sub>
Système cristallin	Tétragonal
Maille élémentaire	Octaédrique
Indice de réfraction	2.61-2.9
Transparence	Transparent
Densité	4.2-4.3 g/cm <sup>3</sup>

Le dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) est un matériau unique en raison de ses propriétés souples qui englobent un indice de réfraction élevé, une large bande interdite (3.2 eV), et une résistance aux impacts chimiques et physiques. De plus, le dioxyde de titane possède de très bonnes propriétés semi-conductrices, ce qui a engendré un engouement important de la part des scientifiques pour des applications diverses, et notamment pour la photocatalyse, les revêtements antireflets, les guides d'ondes optiques, les cristaux photoniques, les dispositifs à base de structures métal/ferroélectrique/isolant/semi-conducteur (Haniniet *al.*,2014).

Le dioxyde de titane TiO<sub>2</sub> existe sous plusieurs formes dont les trois principales sont l'anatase, le rutile et la brookite. Leurs structures cristallographiques sont représentées sur la figure 11(Pighini,2006).



**Figure 11** : Structures cristallographiques de  $\text{TiO}_2$  : (a) anatase, (b) brookite, (c) rutile. En clair  $\text{Ti}^{4+}$  et en foncé  $\text{O}_2^-$  (**Pighini, 2006**)

#### 4.5.2. Les effets de nanoparticules $\text{TiO}_2$ sur les végétaux

Beaucoup d'études concernant les effets de nanoparticules sur les végétaux mettent en évidence des effets bénéfiques et des effets néfastes (**Larue, 2011**), les nanoparticules ont la capacité d'accélérer la germination des graines, d'augmenter l'élongation des racines et de stimuler la croissance de plusieurs plantes à faible concentration, de l'ordre du mg/L ou g/L suivant le milieu d'exposition (**Lawareet al., 2014**) (**Feiziet al., 2012**).

**Tumburuet al. (2015)** indiquent que les effets bénéfiques sur les plantes seraient dus au stress oxydatif (compte tenu des modifications génétiques et sur les activités enzymatiques), et qu'un mécanisme de défense permettrait d'accélérer la croissance de la plante. Cependant, si la quantité en NPs  $\text{TiO}_2$  augmente, ce stress devient alors plus important et engendre des effets néfastes sur la plante pouvant aller jusqu'à des dommages sur l'ADN (**Pakrashiet al., 2014**).

Les études des mécanismes de toxicité ont montré que les nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  induisaient des effets indésirables qui étaient principalement causés par le stress oxydatif, conduisant à des dommages cellulaires, des effets génotoxiques, et des réponses inflammatoires. Dans l'ensemble, l'exposition globale du  $\text{TiO}_2$  nanométrique n'est pas assez connue, il demeure encore de nombreuses interrogations. Il est donc difficile de faire une évaluation complète et fiable du risque.

L'un des principaux constats est qu'en raison de la polyvalence du  $\text{TiO}_2$  en termes de taille, de forme, de traitement de surface, de structure cristalline, de sa dispersion dans un cadre biologique, aucune conclusion globale ne semble pouvoir être tirée, puisque les différentes formes de  $\text{TiO}_2$  peuvent agir très différemment (Rossano, 2014).

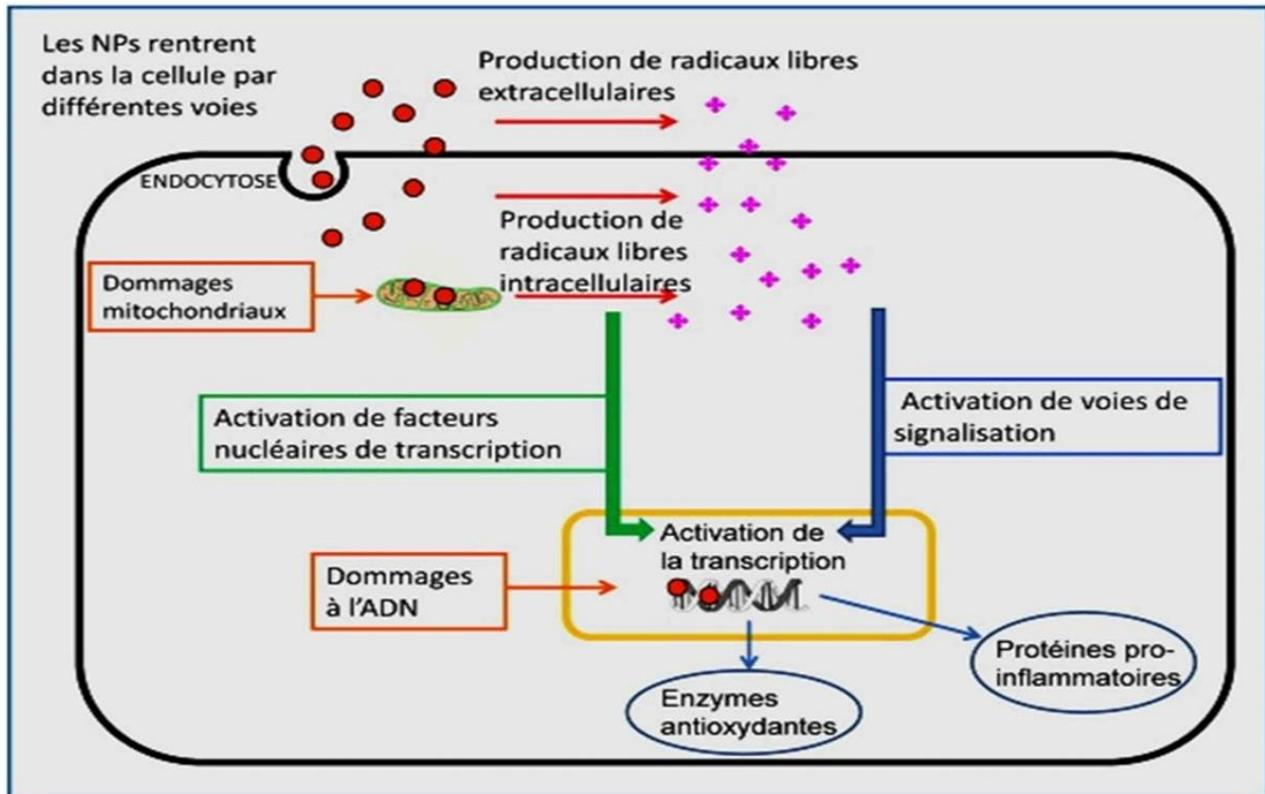


Figure 12 : Mécanisme d'action des nanoparticules (Maranoet al., 2013).

# **Matériel et Méthodes**

Notre étude a été effectuée au sein du « Laboratoire d'écotoxicologie » du département de Biologie Moléculaire et Cellulaire, de l'Université de Jijel.

### 1. Description du matériel biologique

L'expérimentation est menée sur des grains de blé dur *Triticum durum* Desf (Var, Siméto), qui nous ont été fournies par l'Office Algérien Interprofessionnel des Céréales (OAIC) d'El Hadjar, Annaba, Algérie.

### 2. Présentation du matériel chimique

Notre matériel chimique correspond à des nanoparticules de dioxyde de titane sous sa formule chimique  $TiO_2$  et de structure cristalline "anatase" de 25 nm de diamètre. Les nanoparticules sont obtenues depuis le Laboratoire de Chimie des Matériaux Inorganique au niveau de l'université Badji Mokhtar Annaba (LCMI)(UBMA).

#### 2.1. Techniques de caractérisation

- **Diffraction des rayons X (DRX)**

La diffraction des rayons X (DRX) est mise en œuvre afin de déterminer la structure cristalline et la taille moyenne des cristallites de  $TiO_2$ . Le diffractomètre utilisé pour la caractérisation des grains de  $TiO_2$  est de type Panalytical X'PERT avec un détecteur XCELERTOR.

- **Détermination de la taille des grains**

La taille des grains est calculée selon la méthode Scherrer (**Sherrer, 1918**). La taille moyenne des grains "D" est déduite à partir de la largeur à mi-hauteur des pics de diffraction de rayon X, selon l'équation suivante :  $D = 0.94 \lambda / \beta \cos \theta$

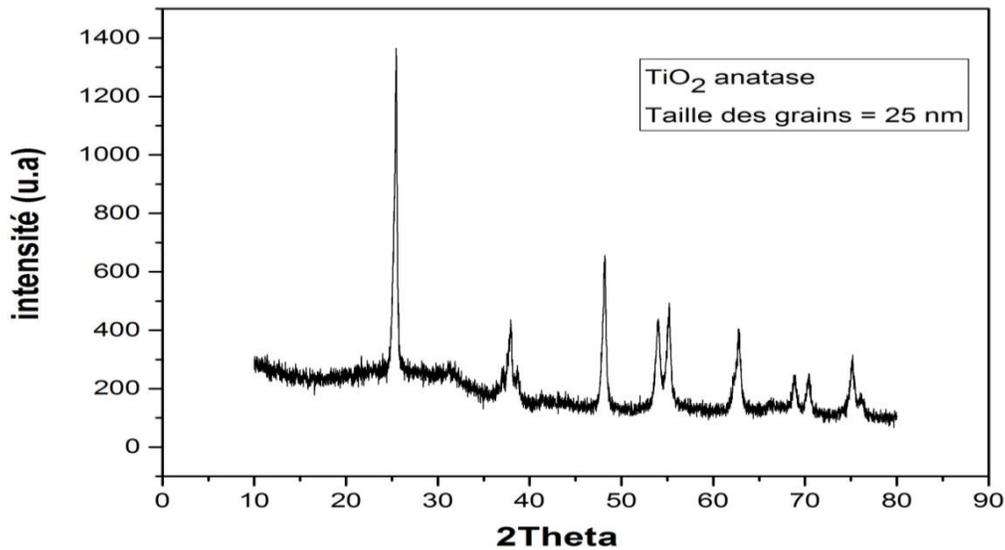
Où :

D : Taille moyenne.

$\lambda$ : Longueur d'onde des RX égale à 1.5406 Å

$\beta$  : Largeur à mi-hauteur du pic exprimée en radians.

$\theta$  : Angle de Bragg du pic.



**Figure 13:** Diagramme de diffractions des rayons X de nanoparticules de TiO<sub>2</sub>.

La figures 14 représente les spectres de diffraction des rayon X de notre poudre caractérisée, il nous confirment l'ensemble des plans diffracter, associés à la structure cristalline "anatase" de TiO<sub>2</sub> selon le standard (JCPDS Card no. 21-1272).

### 3. Protocol expérimental

Les graines ont été stérilisées pendant 30 secondes avec de l'éthanol à 40%, puis décontaminées avec de l'hypochlorite de sodium a 7% pendant 10 min, ensuite rincées abondamment à l'eau distillée pendant 5 min (Léguillonet *al.*, 2003). Après les graines passent par l'étape de la vernalisation afin de faciliter et d'homogénéiser leur germination, ou ils sont placés dans de l'eau distillée pendant une nuit.

#### 3.1. La mise en culture des graines de blé

Les graines de blé sont triées avant leur utilisation, elles doivent êtres saines et ne présente aucune anomalie visible (pas de cassure ni signes apparents de maladies). Elles sont ensuite mises à germer dans des pots contenant de sol, à raison de 15 graines par pots.

Ces graines sont exposées à un sol traité avec des nanoparticules métalliques de dioxyde de

titane ( $\text{TiO}_2$ ). Le traitement du sol est réalisé par l'arrosage via une suspension de nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  dans l'eau dé ionisée ( $18 \text{ M}\Omega$ ), qui a subi une sonication de la solution pendant 30 minutes ( $150 \text{ W}$ ,  $40 \text{ Hz}$ ,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ; (Wang *et al.*, 2016). Cette solution est pulvérisée et mélangée au sol. Le traitement est réalisé pendant 14 jours de traitement (Kaur *et Diffus*, 1989).

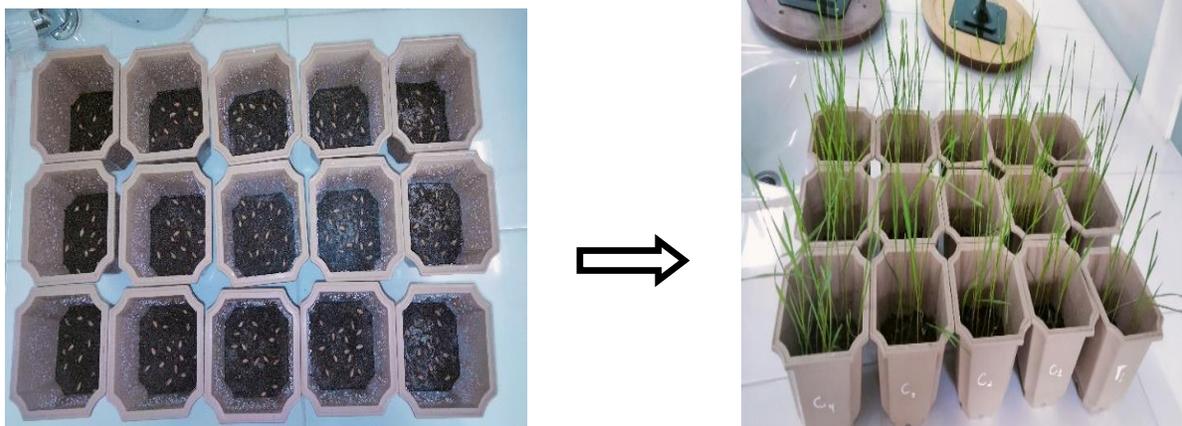
Nous avons retenu quatre concentrations croissantes (50 ; 200 ; 800 ; 1600 ppm), ainsi qu'un témoin.

L'essai est conduit dans une salle de laboratoire dont :

- La température est de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  le jour (16h) et de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  la nuit (8h),
- L'humidité est maintenue à 70% environ.

### 3.2. Préparation post-traitement

Lors de la récolte, les parties aériennes et les racines sont récupérées. Les racines sont lavées à l'eau distillée puis séchées entre deux couches de papier filtre. Les lots destinés à l'étude de la croissance sont pesés et les longueurs des racines et des feuilles sont mesurées.



Après 14 jours

**Figure 14:** La croissance des plants de blé traités par le  $\text{TiO}_2$  après 14 jours.

### 4. Méthodes d'analyses

Les paramètres retenus pour évaluer l'effet des nanoparticules de TiO<sub>2</sub> sur les graines de blé au cours et après la germination sont étudiés à travers certaines mesures :

#### 4.1. Paramètres germinatifs et morphométriques

##### a) Taux de germination

Le taux de germination est déterminé durant les 5 premiers jours ainsi qu'à la fin de l'essai à partir du nombre total des graines (NT) mises en germination et le nombre total de graines germées (NI).

Il est exprimé en (%) par le rapport nombre de graines germées sur nombre total de graines (Côme, 1970).

Selon la formule suivante :

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

##### b) Mesure de la longueur des parties aérienne et souterraine (LMF, LMR)

Les paramètres d'élongations foliaires et racinaires sont déterminés par la mesure de la partie aérienne et de la partie racinaire des plantules avec une règle graduée (Mammadov, 1999). Cela, à la fin du traitement.

Nous retenons la longueur maximale pour chaque graine. Nous procédons ensuite au calcul de la moyenne pour chaque répétition.

#### 4.2. Paramètres physiologiques

##### a) Analyse de la perméabilité membranaire (TRE)

La feuille excisée à la base du limbe est pesée (Poids Frais : PF), puis trempée dans de l'eau distillée et gardée à l'obscurité pendant 24 heures afin d'avoir un taux maximal de réhydratation.

La feuille est retirée, puis pesée (Poids de Turgescence: PT). L'échantillon est séché à l'étuve à 75°C durant 48 heures puis pesée (Poids Sec: PS). La teneur relative en eau (TRE %) est déterminée à partir de la formule de Clarck et Mc Craig (1982):

$$\text{TRE (\%)} = [(\text{PF} - \text{PS}) / (\text{PT} - \text{PS})] \times 100$$

### b) Dosage de la chlorophylle

Les teneurs en chlorophylles a et b sont déterminées en suivant le protocole de Lichtenthaler (1987). L'extraction est réalisée par le broyage à froid d'un gramme de matière fraîche foliaire à quoi on ajoute 25 ml d'acétone. Après broyage, la solution est filtrée puis centrifugée à 5000 g pendant 10 min, à 4°C. Une mesure de l'absorbance A est effectuée à 662 et 645 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. Les teneurs en pigments exprimées en mg.g<sup>-1</sup> de poids frais, sont calculées à partir des équations suivantes :

$$\text{Chl. } a = 12.7 (\text{D.O. } 663 \text{ nm}) - 2.69 (\text{D.O. } 645 \text{ nm}).$$

$$\text{Chl. } b = 22.9 (\text{D.O. } 645 \text{ nm}) - 4.68 (\text{D.O. } 663 \text{ nm}).$$

$$\text{Chl. } (a+b) = 8.02 (\text{D.O. } 663 \text{ nm}) + 20.20 (\text{D.O. } 645 \text{ nm}).$$

### 4.3. Dosage de la catalase (CAT)

#### a) Préparation de l'extrait enzymatique

Les échantillons de feuilles et de racines (0,5 g) sont homogénéisés dans un tampon phosphate (50mM, pH=7,8) dans un bain de glace. L'extrait est centrifugé à 12000 g pendant 15 min. Le surnageant est utilisé pour les dosages enzymatiques. (Cakmak et al., 1991)

#### b) Analyse de l'activité Catalase (CAT)

L'activité de la catalase (CAT) est mesurée selon la méthode de **Cakmak et al. (1991)**. Le mélange d'essai (3,0 ml) est composé de 100µl d'extrait enzymatique, 50 µl H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (300 mM) et 2,85 ml de

tampon phosphate 50 mM (pH = 7,2). La vitesse de décomposition de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> est déterminée en mesurant la diminution de l'absorbance à 240 nm.

Les résultats sont exprimés en  $\mu\text{mol}/\text{min}/\text{mg}$  de protéines.

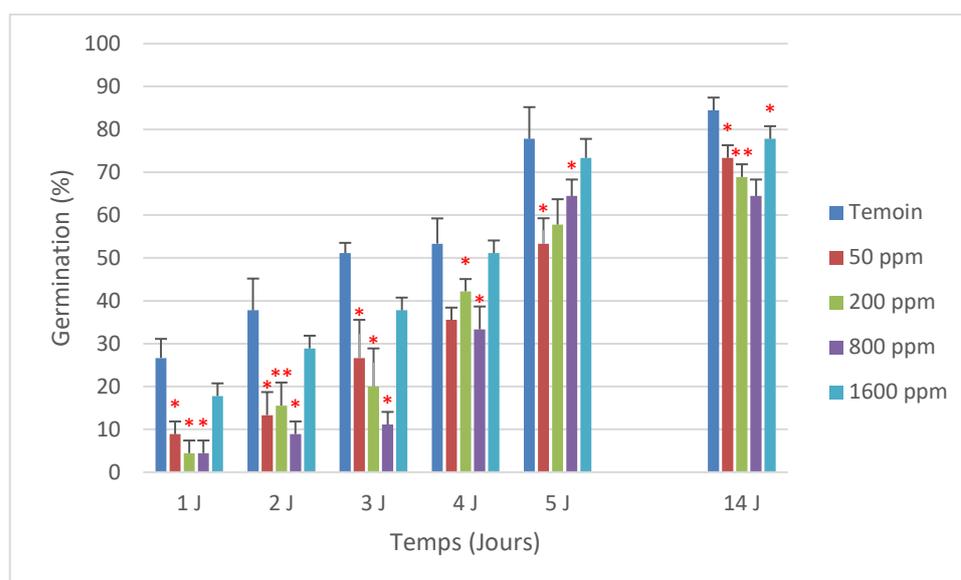
#### 4.4. Analyse statistique

L'analyse statistique des données est effectuée par le test T de Student. Ce test est réalisé à l'aide d'un logiciel d'analyse des données : Minitab (Version 16.0).

# Résultats

## 1. Impact des NPs de TiO<sub>2</sub> sur le taux de germination

La figure (15) illustre l'effet des concentrations croissantes de nanoparticules de TiO<sub>2</sub> sur le pourcentage de germination de blé dur *Triticum durum* Desf.



**Figure 15 :** Effet des concentrations croissantes de nanoparticules de TiO<sub>2</sub> sur le taux de germination de blé dur *Triticum durum* Desf.

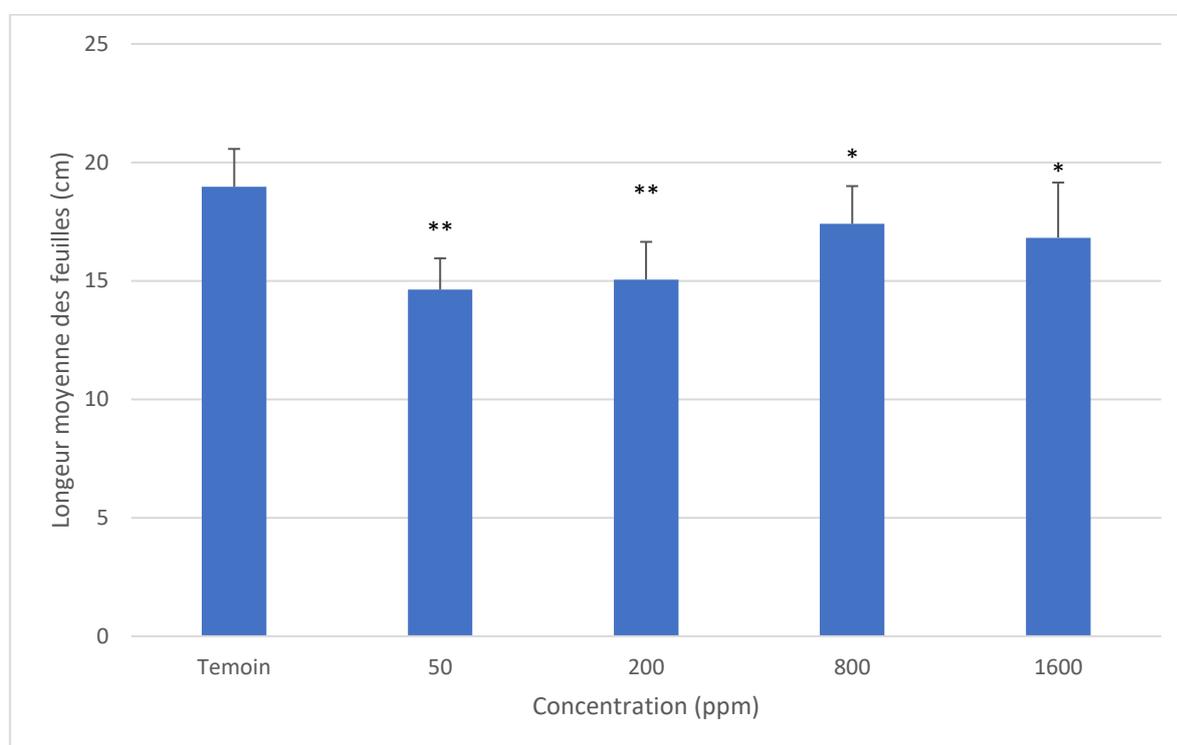
Nos résultats mettent en évidence une diminution du taux de germination (PG) des graines de blé exposées aux concentrations croissantes de nanoparticules de TiO<sub>2</sub>, par rapport aux graines de blé témoins. Les traitements au Nano-TiO<sub>2</sub> affectent significativement le taux de germination dans les 3 premiers jours. En effet, le taux de germination atteint 5% chez les traités par les concentrations (200 et 800 ppm), alors qu'il est de 26% chez des graines témoins. Cette grande différence est moins visible après 14 jours.

Nous remarquons aussi une augmentation du taux de germination des graines de blé traitées à la plus forte concentration de nanoparticules de TiO<sub>2</sub> (1600 ppm), comparativement aux autres graines traitées par les différentes concentrations.

## 2. Impact des NPs de TiO<sub>2</sub> sur la synthèse des paramètres morphométriques

### a) Longueur Moyenne des Feuilles

La figure 16 illustre l'effet des concentrations croissantes de nanoparticules de TiO<sub>2</sub> sur la longueur moyenne des feuilles de blé dur *Triticum durum* Desf.

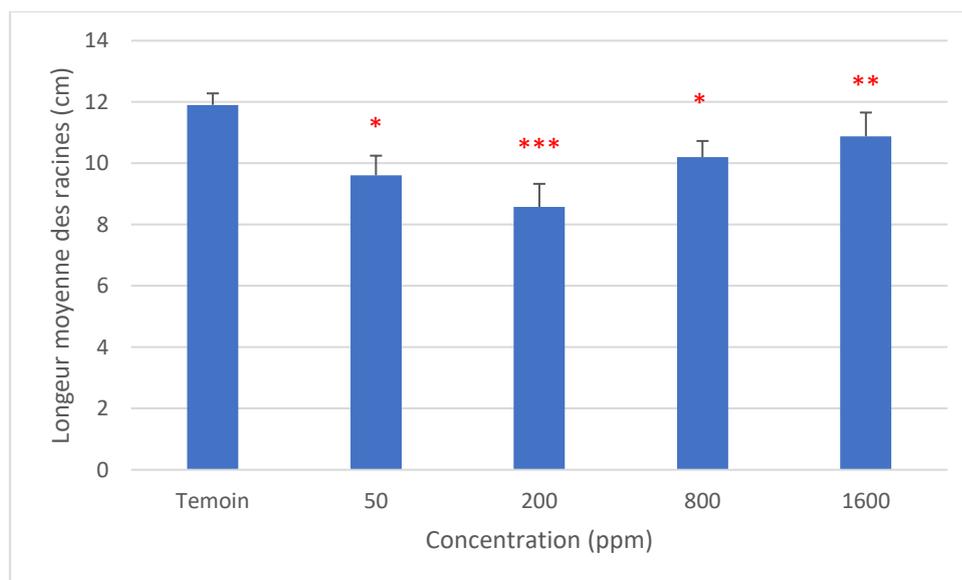


**Figure 16 :** Effet des concentrations croissantes de nanoparticules de TiO<sub>2</sub> sur la longueur moyenne des feuilles de blé dur *Triticum durum* Desf.

Selon nos résultats, on remarque, une diminution significative des longueurs moyennes des feuilles de blé exposées aux concentrations croissantes de nanoparticules de TiO<sub>2</sub> par rapport aux témoins. Elle passe de 18 cm chez les feuilles témoins à 14 cm chez les traitées par la concentration 200ppm.

### b) Longueur moyenne des racines

L'effet des concentrations croissantes de nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  sur la longueur moyenne des racines de blé tendre *Triticum durum* Desf, sont illustré dans la figure (17).



**Figure 17 :** Effet des concentrations croissantes de nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  sur la longueur moyenne des racines de blé tendre *Triticum durum* Desf.

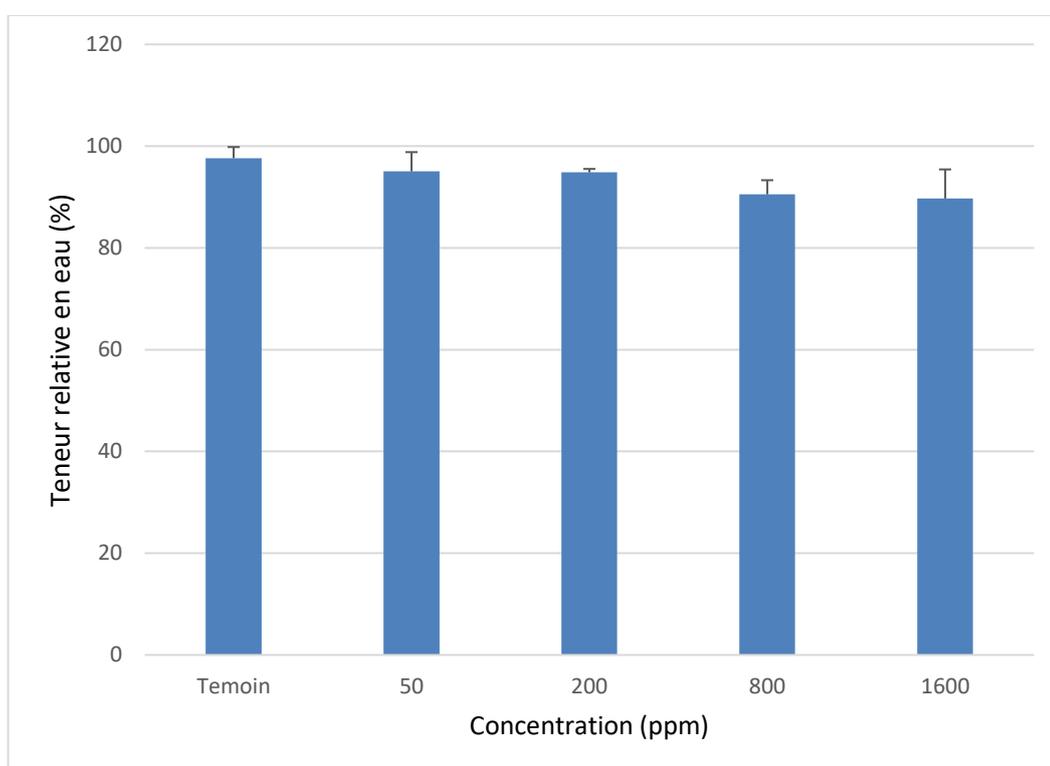
La figure (17) met en évidence l'effet des nanoparticules d'oxydes de titane sur la longueur moyenne des racines de blé dur après 14 jours de traitement. Nous constatons une diminution significative de la longueur moyenne de racines des graines traitées par les concentrations croissantes  $\text{TiO}_2$ , par rapport aux témoins. Cette diminution est très hautement significative chez les lots traités par la concentration 200ppm.

Nous remarquons aussi, une augmentation de la longueur des racines chez les lots traités par la concentration (800 et 1600 ppm), comparativement aux deux autres concentrations ou elle atteint 10,20 cm et 10,87 cm, alors qu'elle n'était que de 8,57 cm pour les traites par la concentration (200ppm).

## 3. Impact des nanoparticules TiO<sub>2</sub> sur la synthèse des paramètres physiologiques

### a) La teneur relative en eau

L'effet des concentrations croissantes de nanoparticules de TiO<sub>2</sub> sur la teneur relative en eau au niveau des feuilles de *Triticum durum* Desf, est illustré dans la figure(18).

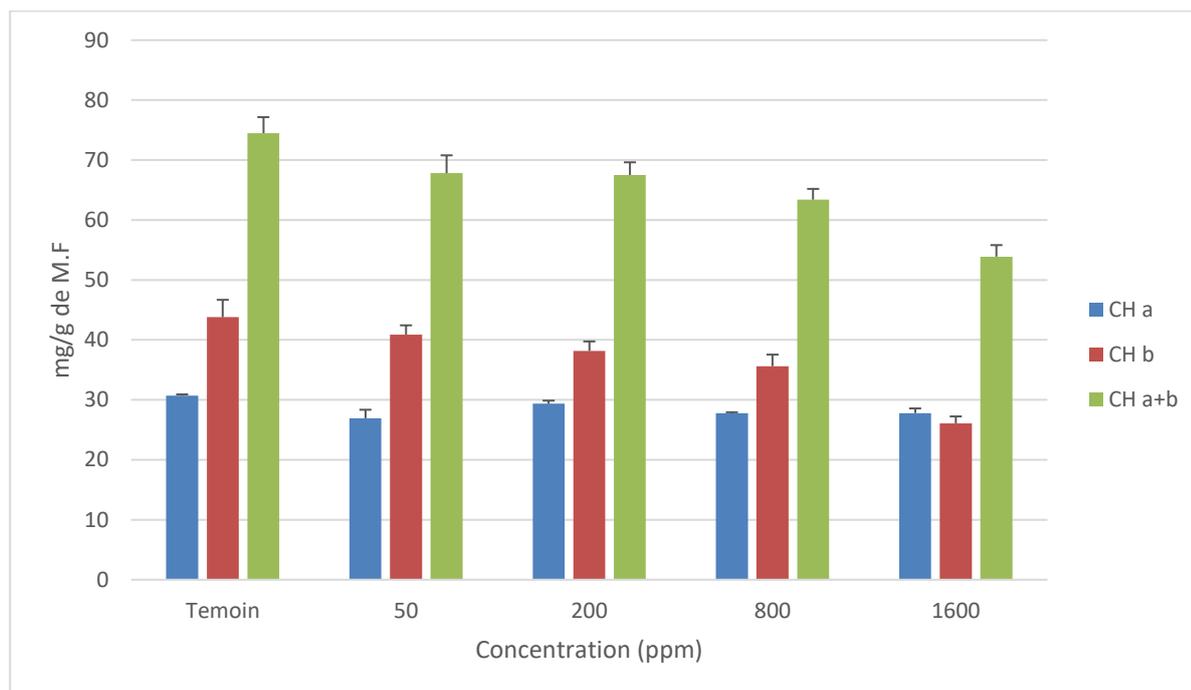


**Figure 18 :** Effet des concentrations croissantes de nanoparticules de TiO<sub>2</sub> sur la teneur relative en eau au niveau des feuilles de *Triticum durum* Desf.

Nos résultats montrent que la teneur relative en eau (TRE) tend à diminuer d'une manière dose dépendante, au niveau des feuilles de plantes traitées par les concentrations croissantes de nanoparticules de TiO<sub>2</sub>, comparativement à celles des témoins. En effet, cette baisse est de l'ordre de 7 et 8 % pour les traitées aux deux plus fortes concentrations (800 et 1600 ppm) de nanoparticule de TiO<sub>2</sub> testées par rapport aux témoins.

### b) Les Pigments chlorophylliens :

La figure (19) met en évidence l'effet des concentrations croissantes des nanoparticules de  $TiO_2$  sur les variations de la teneur en chlorophylle au niveau des feuilles.



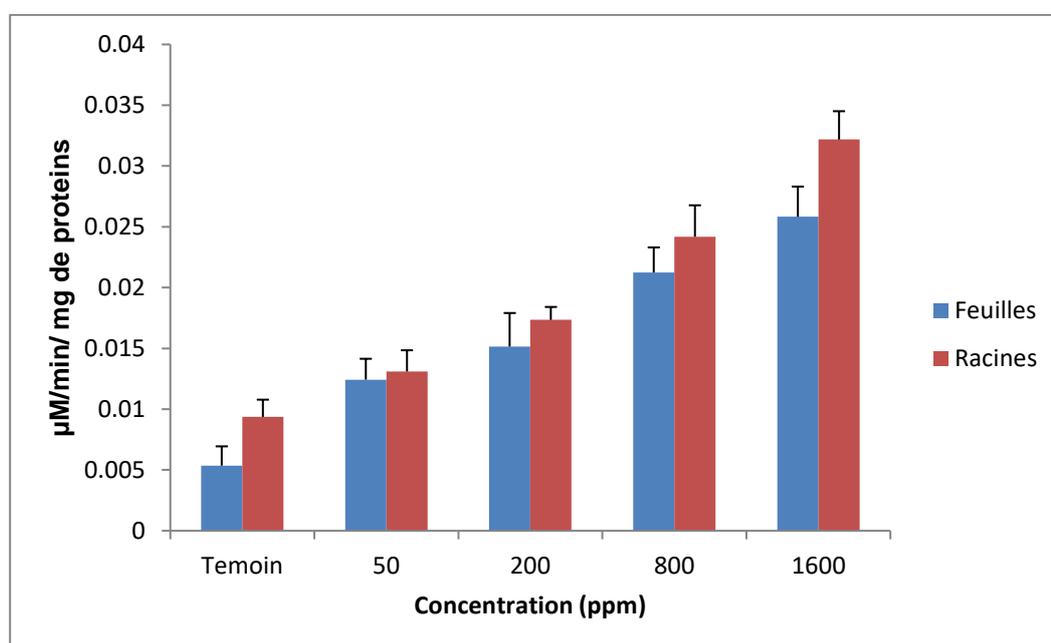
**Figure 19 :** Effet des concentrations croissantes de nanoparticules de  $TiO_2$  sur la teneur des pigments photosynthétiques des plantes de blé dur *Triticum durum* Desf.

Nos résultats, illustrent une diminution des teneurs en pigments chlorophylliens (a, b, a+b) au niveau des feuilles traitées par les concentrations croissantes de nanoparticules de  $TiO_2$ , par rapport aux feuilles témoins. Effectivement, cette diminution est enregistrée particulièrement chez les plantes exposées à la plus forte concentration (1600 ppm), elle est de l'ordre de 55% de la teneur en chlorophylle totale par rapport aux témoins.

### 4. Impact des nanoparticules de TiO<sub>2</sub> sur la synthèse des paramètres enzymatiques

#### a) L'activité Catalase

L'évolution de l'activité CAT au niveau des feuilles et des racines de blé traitées par les concentrations croissantes de nanoparticules de TiO<sub>2</sub>, sont illustrée dans la figure (20).



**Figure 20:** Effet des concentrations croissantes de nanoparticules de TiO<sub>2</sub> sur l'évolution de l'activité catalase au niveau des racines et des feuilles de *Triticum durum* Desf.

Nos résultats montrent une induction de l'activité CAT au niveau foliaire et racinaire, chez les traitées par les concentrations croissantes de nanoparticules de TiO<sub>2</sub> par rapport aux témoins.

Cette augmentation atteint une activité maximale chez les feuilles traitées par la plus forte concentration testée (1600 ppm), elle est de l'ordre de 0,025 μM/min/mg de protéines alors qu'elle n'est que de 0,005 μM/min/mg de protéines chez les témoins. Ainsi, chez les racines traitées l'activité CAT est d'une valeur de 0,032 μM/min/mg de protéines, tandis que chez les témoins elle n'est que de 0,009 μM/min/mg de protéines.

# **Discussion**

Les nanoparticules métalliques sont considérées comme catégorie de nanomatériaux la plus largement utilisées en nanotechnologie. Les NPs métalliques ont la capacité d'induire des effets néfastes au niveau de plusieurs organismes vivants (**Li et Chen, 2011**). Cependant, le rôle du rapport taille/surface et de la structure dans l'interactions entre les NPs et les cellules, ainsi que leurs mécanismes de toxicité au niveau cellulaire ne sont pas totalement compris (**Kheneet al., 2017**). D'autre part, les nanoparticule sont la capacité d'être très mobiles, ce qui leur permet de se disséminés sur de larges distances (**Keller et al., 2010**). Cette mobilité dépend des propriétés du sol et des conditions physicochimiques du milieu (**Rottmanetal., 2013 ; JoskoetOleszczuk, 2013**).

La germination, est un processus complexe et considéré comme fortement affecté par la présence de toxiques. Ainsi, le pourcentage de germination peut être considéré comme un paramètre reflétant la qualité de l'environnement de la plante. Dans notre étude, un effet inhibiteur/perturbateur a été observé suite a l'exposition des graines de blé *Triticum durum* Desf. a des nanoparticules de Dioxyde de Titane .

Nos résultats sont en accord avec les travaux de Castiglioneet al. (2011) qui ont montré que les NPs deTiO<sub>2</sub> affectent négativement la germination des graines et la croissance des plants de *Vicia narbonensis* et de *Zeamays*.

Le résultat d'autres études a montré que l'utilisation de TiO<sub>2</sub> et de NP- TiO<sub>2</sub>a un effet inhibiteur sur la germination du blé (**Feiziet al.,2012**).L'inhibition provoquée par le titane métallique et le dioxyde de titane revient à l'absorption sélective des métaux par les plantes. Cela a été prouvé que les plantes ont le potentiel génétique d'absorption sélective des métaux dans la nature (**Stefanovet al., 1995**).D'autres études ont montré que les graines traitées par des concentrations croissante de NP- TiO<sub>2</sub>ont observées une diminution du taux de germination des graines de *Melissa officinalis* L. qui ont une capacité d'absorption de TiO<sub>2</sub> et de NP- TiO<sub>2</sub>(**Prasad et al., 2012**).

De plus les travaux de Badshah et al.(2023) sur deux variétés de *Triticumaestivum*L ont mis en évidence que des concentrations de NPs de TiO<sub>2</sub> ont montré des effets néfastes sur la germination, les attributs biochimiques, et a causé un stress chez les deux variétés de blé.

Ces auteurs expliquent la raison de la diminution de la germination 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 études sur les effets des nanoparticules sur les végétaux se sont penchées à l'étude de l'élongation des différentes parties de la plante (**Kumar et al., 2013**). Dans notre étude, nous avons observé que les nanoparticules de TiO<sub>2</sub> ont un effet négativement sur la croissance des racinaires et foliaires du blé dur.

Nos résultats sont en accord avec les travaux de Asil et Neumann (2009) qui ont montré que les NPs de TiO<sub>2</sub> causent une diminution de la croissance foliaire après l'exposition à des NP de TiO<sub>2</sub> de 25 nm.

De plus les travaux de Thakur *et al.* (2021) ont rapporté une diminution de la longueur des racines et des feuille 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 (**BaniketLuque, 2017**).

Nos résultats sont confirmés aussi par les travaux de Lee *et al.* (2010) qui ont révélé une diminution de la croissance des feuilles d'*A. thaliana* exposées aux nanoparticules de ZnO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> et SiO<sub>2</sub>. Des résultats identiques ont été obtenus par Shi *et al.* (2011) et Wu *et al.* (2012) qui indique que les NPs de CuO affecte la longueur foliaires des plantes terrestres et aquatiques.

Des résultats similaires ont également été obtenus par Ma *et al.* (2010) concernant l'effet des NPs de TiO<sub>2</sub> et de ZnO sur la germination et l'élongation des racines de blé tendre *Triticum aestivum*. Donc, d'une manière globale, les NPs d'oxydes de titane 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**).

Plusieurs études ont mentionné une séquestration des nanoparticules par les végétaux supérieure suite à une exposition (**Corredoret al., 2009 ; Uzuet al., 2010**) sachant que le taux de pénétration dépend surtout de la taille et des propriétés de surface des nanoparticules (**Dietz etHerth, 2011**).

Plus les particules sont petites plus elles sont considérées comme nocives, parce qu'ils ont une réactivité élevée(**Hund-Rinkeet Simon 2006**). Au niveau des vegetaux les NPs peuvent pénétrer par la voie racinaire mais aussi via les stomates (**Silva et al., 2006**).

Pour la turgescence foliaire, cette dernière est en relation directe avec la capacité du végétal à garder un niveau d'hydratation des tissus optimal et qui peut garantir une continuité de l'activité métabolique (**Aoumeur, 2012**). Le changement de la TRE des plants de *Triticum Durm desf* indique que les NPs de TiO<sub>2</sub> engendrent une baisse de la turgescence marquée par une diminution du TRE au niveau des foliaires.

Nos résultats sont confortés par des recherches qui ont étudiées l'effet des métaux lourds sur la teneur relative en eau des feuilles de maïs, de blé tendre et du blé dur et d'orge, (**Labraet al., 2006 ; Sang-Hoon et al., 2007**). Cette baisse indiquerait une réduction de la pression du gonflement dans les cellules végétales. Ce qui cause, une réduction du potentiel hydrique de la plante afin de maintenir un taux de transpiration stable (**Karam et al., 2009**).

En outre, la génération de ERO connue pour entraîner des dommages membranaires au niveau cellulaire et subcellulaire, cela aura pour conséquence une fuite d'ions et une mort cellulaire. Afin de maintenir la turgescence de ces cellules, les plantes font intervenir d'autres mécanismes de tolérance qui contribuent à leur adaptation face à la perturbation osmotique et ionique (**Driouich et al., 2001**).

Entre autres, nos résultats indiquent une diminution des concentrations en pigments photosynthétiques chez les feuilles des plantes exposées aux nanoparticules de TiO<sub>2</sub>. Nos résultats vont dans le même sens que ceux de Raskar et Laware (2014), qui a indiqué que les nanoparticules de ZnO inhibaient la biosynthèse de la chlorophylle ainsi que l'efficacité de la photosynthèse chez les feuilles d'*Arabidopsis*. Il en est de même des travaux de Nair et Chung (2014); Barhoum et al. (2015) qui ont signalé une diminution de la teneur en chlorophylle après exposition aux nanoparticules métalliques.

Plusieurs auteurs rapportent une diminution 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 ; Chiahiet al., 2016**), il en est de même de (**Yahyaoui, 2021**). Qui indique une diminution des concentrations en pigments chlorophylliens au niveau des feuilles de blé dur exposées aux nanoparticules de ZnO et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Les polluants sont susceptibles d'agir à de multiples niveaux du processus photosynthétique et ce par le fait de provoquer des changements dans la structure chloroplastique conduisant à la diminution de l'activité photosynthétique (**Ben Ammar et al., 2005**).

Dans des conditions de stress oxydatif causées par des nanoparticules, les ERO endommagent et cassent les pigments photosynthétiques et les protéines structurales des systèmes photosynthétiques **(Dimkpaet *al.*, 2013)**

Nos résultats montrent aussi une induction de l'activité CAT au niveau foliaire et racinaires, chez les traitées par les concentrations croissantes de nanoparticules de TiO<sub>2</sub>.

Ainsi les travaux de Faisal *et al.* (2013) et de Hernandez-Viezcas *et al.*, (2011) montrent une induction de l'activité CAT au niveau racinaires de *Lycopersicon esculentum*, et des feuilles de *Prosopis juliflora-velutina* exposées aux concentrations croissantes de NPs d'oxydes de Nickel (NiO) et Oxyde de Zinc (ZnO), respectivement. Ce qui corroborent nos résultats, qui ont également montré une augmentation de la quantité de l'enzyme catalase dans la cellule végétale du blé dur traités par des concentrations croissantes de nanoparticules de TiO<sub>2</sub>. D'autre part, Li *et al.* (2016) illustrent une induction de l'activité catalase au niveau des racines et des feuilles de maïs *Zeamays L.* traitées par les NPs de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Cette induction CAT est révélée par Sheteiwy *et al.* (2015) chez les plantes *d'Oryza sativa* exposées aux nanoparticules de ZnO. Yang *et al.* (2006) notent aussi que l'induction de l'activité catalase qui est localisée au niveau des mitochondries et des peroxysomes, ce qui est étroitement liée à l'augmentation de la concentration intracellulaire du peroxyde d'hydrogène.

# **Conclusion**

L'utilisation croissante des nanotechnologies et des nanoparticules manufacturées dans divers domaines d'activités, s'explique par leurs propriétés innovantes. Toutefois, cette utilisation augmente le risque d'exposition des écosystèmes et de l'environnement aux nanoparticules. C'est principalement dû à leur relargage dans l'environnement. Cela leur donnera une capacité importante à interagir avec les constituants de l'environnement.

Les végétaux constituent la première cible d'exposition aux polluants au niveau des sols et de l'air, parmi eux les nanoparticules. De plus, ils ont un rôle écologique important au sein des écosystèmes et présentent un intérêt majeur dans les études écotoxicologiques en tant qu'espèces bio-indicatrices et/ou bio-accumulatrices.

Dans notre étude, nous pouvons conclure que les nanoparticules de dioxyde de titane induisent un effet toxique chez les plantes de blé. Ainsi nous avons confirmé une diminution du processus de germination confirmée par une réduction du développement racinaire et foliaire des plantes de blé exposées aux concentrations croissantes des NPs de  $\text{TiO}_2$ . Le ralentissement de la croissance, pourrait être expliqué par une inhibition de la division cellulaire et de l'élongation racinaire et l'expansion foliaire.

D'autre part, nous avons mis en évidence une réduction de la teneur relative en eau (TRE), ainsi qu'une diminution des teneurs en chlorophylle chez les plantes traitées comparativement aux témoins.

Pour finir, nous avons constaté aussi une induction de l'activité catalase au niveau racinaire et foliaire qui a pour rôle la défense cellulaire contre la génération de radicaux libres et la nécrose tissulaire. Ce qui pourrait indiquer la présence d'un stress oxydatif déclenché par l'exposition aux NPs de  $\text{TiO}_2$ .

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

- Conduire des expériences avec des concentrations plus larges et des durées d'exposition plus longues mimant ainsi une contamination chronique de l'environnement pour mieux cerner les mécanismes de toxicité.
- Réaliser le dosage des autres enzymes antioxydantes afin de pouvoir confirmer le déclenchement d'un stress oxydant.

- Procéder à des analyses de microscopie électronique à transmission (TEM), pour permettre la localisation des NPs au niveau tissulaire et d'observer leurs effets au niveau cellulaire.

**Références**

**bibliographiques**

### A

Auffan, M., Rose, J., Bottero, J. Y., Lowry, G. V., Jolivet, J. P., & Wiesner, M. R. (2009). Towards a definition of inorganic nanoparticles from an environmental, health and safety perspective. *Nature nanotechnology*, 4(10), 634-641.

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.

Auffan, M., Rose, J., Wiesner, M.R., Bottero, J.Y., 2009. Chemical stability of metallic nanoparticles: A parameter controlling their potential cellular toxicity in vitro. *Environ. Pollut.* 157(4): 1127-1133.

Asli, S., & Neumann, P. M. (2009). Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport. *Plant, cell&environment*, 32(5), 577-584.

Amrouche I., et Mesbah A. 2017. Effet du stress abiotique sur l'accumulation des protéines totales chez deux variétés de blé dur (*Triticum durum Desf.*). Mémoire de master en biologie. Option Biologie et génomique végétale. Université des Frères Mentouri Constantine Algérie, 66p.

Ait Abdallah- Djennadi F. Hamadou D. Bessai D. Gaagaa Y. (2014). Effet de la fertilisation azotée de la culture de blé sur l'évolution du rendement et de ses composantes et sur l'amélioration de la teneur du sol en phosphore assimilable dans la région de Khroub. *Céréaliculture : revue technique et scientifique de l'Institut Technique des Grandes Cultures.* Numéro 62 : 6 et 7.

## Références bibliographiques

---

Alaoui, S. B. (2005). Référentiel pour la Conduite Technique du palmier dattier. *Référentiel de Conduite Technique des Principales Cultures au Maroc*. Éditeurs : Si Bennasseur Alaoui et AjiroYasuhei, 102-112.

Abdellaoui, Z., Fettih, S., &Zaghouane, O. (2006). Etude comparative de l'effet du semis direct et du labour conventionnel sur le comportement d'une culture de blé dur. Troisième rencontre méditerranéenne de semis direct, Zaragoza, ED. Opt: méditerranéennes, série A, (69).

Auffan M. (2007). Nanoparticules d'oxydes métalliques : relations entre la réactivité de surface et des réponses biologiques. Physique. Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III. Français.

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.

Ait S., et Ait K., 2008 Contribution à l'étude de l'interaction génotype x milieu, pour la qualité technologique chez le blé dur en Algérie'', Thèses de doctorat, département de biologie, Université BADJI mokhtar de Annaba.

### B

Belkacemi, H. (2011). Dépôt et Caractérisations des Couches minces de ZnO Avec Différentes Sources de Zinc (Doctoral dissertation, UNIVERSITE DE MOHAMED KHIDER BISKRA).

Badshah, I., Mustafa, N., Khan, R., Mashwani, Z. U. R., Raja, N. I., Almutairi, M. H., ... &Sawati, L. (2023). Biogenic Titanium Dioxide Nanoparticles Ameliorate the Effect of Salinity Stress in Wheat Crop. *Agronomy*, 13(2), 352.

Benedicto, A., Missana, T., Degueldre, C., 2013. Predictions of TiO<sub>2</sub>-driven migration of Se (IV) based on an integrated study of TiO<sub>2</sub> colloid stability and Se (IV) surface adsorption. *Science Total Environnement.* 449 : 214-222.

**BELGACEM, O., & CHAREF, M. (2018).** Étude du stress oxydatif généré par les nanoparticules chez *Helix aspersa*: Cas du dioxyde de titane (Doctoral dissertation, Universitelaarbitebessitebessa).

**Béguel, J. P. (2012).** Étude de la capacité antioxydante en lien avec la reproduction chez l'huître creuse *Crassostreagigas*(Doctoral dissertation, Brest).

**Bédrani S. 2001.** Stratégie et politiques agricoles des pays du Maghreb central. *C.R. Agric. 87* :179-188.

**Badri Y. (2018).** L'industrie des nanoparticules dans le domaine de la santé. Université de Lille 2. Faculté ingénierie et management de la santé (ILIS). Ingénierie de la santé health care business and recherche clinique.

**Benbelkacem, A., &Kellou, K. (2000).** Évaluation du progrès génétique chez quelques variétés de blé dur (*Triticum turgidum L. var. durum*) cultivées en Algérie. *Durum wheat improvement in the Mediterranean region: new challenges. CIHEAM–IAMZ, Zaragoza, Spain*, 5-110.

**Bennasseur A. 2003.** Référentiel pour la conduite technique de la culture de blé dur (*Triticum durum Desf*). p. 24-38.

**Bouzar, A.** Synthèse de nanoparticule d'or et leur caractérisation par granulométrie laser (Doctoral dissertation, 07-01-2018).

**G.P. Bolwell,** Role of active oxygen species and NO in plant defense responses, *current opinion in plant biology*.2 (1999) 287–294.

**Barhoumi, L., Oukarroum, A., Ben Taher, L., Smiri, L., Abdelmelek, H., Dewez, D.,**

2015. Effects of superparamagnetic iron oxide nanoparticles on photosynthesis and growth of the aquatic plant Lemnagibba. *archives of Environmental Contamination and Toxicology* 68 (3): 510-520.

### C

Cornejo-Garcia, J A, C Mayorga, M J Torres. 2006 Anti-Oxidant Enzyme Activities and Expression and Oxidative Damage in Patients with Non-Immediate Reactions to Drugs. *Clinical and Experimental Immunology* 145(2):287–295.

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.

S. Choudhury, P. Panda, L. Sahoo, and S. K. Panda, “Reactive oxygen species signaling in plants under abiotic stress,” *Plant Signaling and Behavior*, vol. 8, no. 4, Article ID e236811, 2013.

Clement G et Prats, (1971). Les céréales, Ed.j.B. Bailliers et Fils,360p.

Cadenas, E., 1989. Biochemistry of oxygen toxicity. *annual review biochemistry* 58, 79-110.

Curná, V., & Lacko-Bartošová, M. (2017). Chemical composition and nutritional value of emmer wheat (*Triticum dicocconschrank*): A review. *Journal of Central European*.

Chuto, G., & Chaumet-Riffaud, P. (2010). Les nanoparticules. *Médecine Nucléaire*, 34(6), 370-376.

## Références bibliographiques

---

Cheh ; 2007., Analyse macroéconomique des filières, la filière blés en Algérie. Projet Pamlim « Perspectives agricoles et agroalimentaires Maghrébines Libéralisation et Mondialisation » Alger : 7-9 avril 2007.

Chaki, M., Begara-Morales, J. C., & Barroso, J. B. (2020). Oxidative stress in plants. *Antioxidants*, 9(6), 481.

S. Choudhury, P. Panda, L. Sahoo, and S. K. Panda, “Reactive oxygen species signaling in plants under abiotic stress,” *Plant Signaling and Behavior*, vol. 8, no. 4, Article ID e236811, 2013.

Claire Parent, Nicolas Capelli, James Dat, Formes réactives de l’oxygène, stress et mort cellulaire chez les plantes C. R. Biologies 331, (2008) 255–261

Chibani, D., & HOUAMDI, A. (2022). Etude du comportement et de l'adaptation de quatre variétés locales du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans la région d'El Oued.

Cherfia Radia ; 2010 ; Etude de la variabilité morpho-physiologique et moléculaire d’une collection de blé dur algérien (*Triticum durum* Desf.).

Come, D., 1970. Les obstacles à la germination. *Masson & Cie, Paris*. P 162.

Clarke, J.M., Mc Craig, T.N., 1982. Evaluation of techniques for screening for drought resistance in wheat. *Crop Sci.* 22: 503-506.

Cakmak, I., Horst, J.H., 1991. Effects of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). *Physiologia Plantarum.* 83 :463–468.

## D

## Références bibliographiques

---

David Brian; F; Winter Wheat Production Manual ch10; Growth Stages of Wheat; Published by Ducks Unlimited Canada, and CPS Conservation Production Systems Ltd., Saskatoon, Saskatchewan, 1992. Revised 2018; 1005p.

Demidchik, V. (2015). Mechanisms of oxidative stress in plants: from classical chemistry to cell biology. *Environmental and experimental botany*, 109, 212-228.

Dimkpa, CO, McLean, JE, Martineau, N., Britt, DW, Haverkamp, R. et Anderson, AJ (2013). Des nanoparticules d'argent perturbent la croissance du blé (*Triticum aestivum* L.) dans une matrice de sable. *Sciences et technologies de l'environnement*, 47 (2), 1082-1090.

Djermoun, A. (2009). La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. *Nature & Technology*, (1), 45.

Durin, B., 2006. Transfert et transport colloïdal de polluantes métalliques. Thèse de Doctorat. Université de Nantes, France. p 395.

Dat, J., Vandenaabeele, S., Vranova, E. V. M. M., Van Montagu, M., Inzé\*, D., & Van Breusegem, F. (2000). Dual action of the active oxygen species during plant stress responses. *Cellular and Molecular Life Sciences CMLS*, 57, 779-795.

Delattre J, Beaudeau JL, Bonnefont-Rousselot D. Radicaux libres et stress oxydant. Aspects biologiques et pathologiques. Cachan : Lavoisier, 2005.

### F

Fink, R. C., & Scandalios, J. G. (2002). Molecular evolution and structure–function relationships of the superoxide dismutase gene families in angiosperms and their relationship to other eukaryotic and prokaryotic superoxide dismutases. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 399(1), 19-36.7(1), 58-66

## Références bibliographiques

---

Foltête, J. C., & Piombini, A. (2010). Deviations in pedestrian itineraries in urban areas: a method to assess the role of environmental factors. *Environment and Planning B: Planning and design*, 37(4), 723-739.

Feuillet P, (2000). le grain de blé, composition et utilisation, Editions QUAE, P,308

Feizi, H., Rezvani Moghaddam, P., Shahtahmassebi, N. & Fotovat, A. Impact of Bulk and Nanosized Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) on Wheat Seed Germination and Seedling Growth. *Biological Trace Element Research* 146, 101–106 (2012).

Faichel, M., Saquib, Q., Alatar, A.A., Al-khedhairi, A.A., Hegazy, A.K., Musarrat, J., 2013. Phytotoxic hazards of NiO-nanoparticles in tomato: A study on mechanism of cell death. *Journal of Hazardous Materials* 250– 251: 318– 332.

Fredot, E. (2005). « Connaissance des aliments ». Pages : 157 à 199. Edition TEC et DOC. Lavoisier-Paris.

### G

Glorieux, Christophe, Marcel Zamocky, Juan Marcelo Sandoval, Julien Verrax, and Pedro Buc Calderon 2015 Regulation of Catalase Expression in Healthy and Cancerous Cells. *Free Radical Biology & Medicine* 87: 84–97.

Grolimund, D., Borkovec, M., Barmettler, K., Sticher, H., 1996. Colloid-facilitated transport of strongly sorbing contaminants in natural porous media: A Laboratory column study. *Environmental Science & Technology*. 30: 3118-3123

## Références bibliographiques

---

S. Goldental-Cohen, C. Burstein, I. Biton et al., "Ethephon induced oxidative stress in the olive leaf abscission zone enables development of a selective abscission compound," *BMC Plant Biology*, vol. 17, no. 1, p. 87, 2017.

Gravot A, 2009. Les réponses de stress chez les végétaux. Polycopié cours, Equipe pédagogique Physiologie Végétale. Université de Rennes 1, 34 p.

Gates., 1995 Ecophysiologie du blé Paris, 351p. Technique et documentation. Lavoisier, In : Etude de la contribution des paramètres pheno morphologique dans l'adaptation du blé tendre dans l'étage bioclimatique semi aride. Mémoire de Magister. Fac. Sci. Agro/ Université Elhadj Lakhdar Batna.

Gefifa S., Omrani k. 2018. Etude de l'impact de l'Oïdium sur la culture de blé dur dans larégion de Aïn Bessem. Mémoire de master en biologie. Option protection des végétaux. Université de Bouira Algérie, 34p.

Gate P., 1995. Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture. Ed Lavoisier. 429p.

Guichard C, Pedruzzi E, Fay M, et al. Les Nox/Duox : une nouvelle famille de NADPH oxydases. *Med Sci (Paris)* 2006; 22: 953-9

Gull, A., Lone, A. A., & Wani, N. U. I. (2019). Biotic and abiotic stresses in plants. *Abiotic and biotic stress in plants*, 1-19.

Gardès-Albert, M., Bonnefont-Rousselot, D., Abedinzadeh, Z., & Jore, D. (2003). Espèces réactives de l'oxygène. *L'actualité chimique*, 91.

## H

## Références bibliographiques

---

Hermes-Lima, M., 2005. Oxygen in Biology and Biochemistry: Role of Free Radicals, In K. B. Storey (Ed.), Functional Metabolism: Regulation and Adaptation. Hoboken, NJ: Wiley-Liss, 319-368.

Hervieu, B., R.Capone, S. Abis. 2006. The challenge posed by the cereals sector in the Mediterranean. Ciheam analytical note, N°9, p14.

Haleng, J., Pincemail, J., Defraigne, J. O., Charlier, C., & Chapelle, J. P. (2007). Le stress oxydant. *Revue médicale de Liège*, 62(10).

Hasanuzzaman, M., Hossain, M. A., da Silva, J. A. T., &Fujita, M. (2012). Plant response and tolerance to abiotic oxidative stress: antioxidant defense is a key factor. *Crop stress and its management: perspectives and strategies*, 261-315.

Hernandez-Viezcas, J.A., Castillo-Michel, H., Servin, A.D., Peralta-Videa, J.R., GardeaTorresdey, J.L., 2011. Spectroscopic verification of zinc absorption and distribution in the desert plant *Prosopis juliflora-velutia* (velvet mesquite) treated with ZnO nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*. 170: 346–352.

Hanini, F., Bouabellou, A., Bouachiba, Y., Kermiche, F., Taabouche, A., &Boukheddaden, K. (2014). Propriétés structurales, optiques et électriques des couches minces de TiO<sub>2</sub> dopé Cu obtenues par voie Sol-gel. *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 10(1).

Haruta, M. (1997). Size-and support-dependency in the catalysis of gold. *Catalysis today*, 36(1), 153-166.

Hacini, N. (2014). Etude de l'interaction génotype x environnement et effet de l'origine de quelques cultivars de blé dur (*triticum durumdesf.*) sur les aptitudes adaptatives et qualitives (Doctoral dissertation, 4).

Halliwell, B., & Gutteridge, J. M. C. (1989). Free radicals as useful species. In *Free radicals in biology and medicine* (pp. 366-415). Oxford: Oxford University Press.

### J

Jeevanandam, J., Barhoum, A., Chan, Y. S., Dufresne, A., & Danquah, M. K. (2018). Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. *Beilstein journal of nanotechnology*, *9(1)*, 1050-1074.

Jalil, R. D. A., & Yousef, A. M. (2017). Comparison Study on the Effect of Nano and Bulk Titanium Dioxide Particles on Seeds Germination, Growth and Chemical Composition of Wheat Invitro and Invivo. *Al-Mustansiriyah Journal of Science.*, *28(3)*, 85-101.

Josko, I., & Oleszczuk, P., 2013. Influence of soil type and environmental conditions on ZnO, TiO<sub>2</sub> and Ni nanoparticles phytotoxicity. *Chemosphere*. *92*: 91-99.

### K

Klaine, S. J., Koelmans, A. A., Horne, N., Carley, S., Handy, R. D., Kapustka, L., ... & von der Kammer, F. (2012). Paradigms to assess the environmental impact of manufactured nanomaterials. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *31(1)*, 3-14.

Kouba, S. (2019). *L'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax* (Doctoral dissertation, Université de Sfax).

Kurtz-Chalot, A., Klein, J. P., Pourchez, J., Boudard, D., Bin, V., Alcantara, G. B., ... & Forest, V. (2014). Adsorption at cell surface and cellular uptake of silica nanoparticles

with different surface chemical functionalizations: impact on cytotoxicity. *Journal of nanoparticle research*, 16, 1-15.

Krahne, R., Morello, G., Figuerola, A., George, C., Deka, S., & Manna, L. (2011). Physical properties of elongated inorganic nanoparticles. *Physics Reports*, 501(3-5), 75-221.

S. Karpinski, H. Gabrys, A. Mateo, B. Karpinska, P.M. Mullineaux, Light perception in plant disease defencesignalling, *Current Opinion in Plant Biology*.6 (2003) 390–396.

Kumari, S., & Sarkar, L. (2021). A Review on Nanoparticles: Structure, Classification, Synthesis & Applications. *Journal of Scientific Research*, 65(8)

Khan, Y., Sadia, H., Ali Shah, S. Z., Khan, M. N., Shah, A. A., Ullah, N., ... & Khan, M. I. (2022). Classification, synthetic, and characterization approaches to nanoparticles, and their applications in various fields of nanotechnology: a review. *Catalysts*, 12(11), 1386.

Khan, M. S. A., Borah, K. K., Goswami, Y., Hakeem, K. R., &Chakrabartty, I. (2021). The potential exposure and hazards of metal-based nanoparticles on plants and environment, with special emphasis on ZnO NPs, TiO<sub>2</sub> NPs, and AgNPs: A review. *Environmental Advances*, 6, 100128.

Khan MA, Li W, Yamaguchi S, Kamiya Y. Effects of heavy metals on seed germination and early seedling growth of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Growth Regulation*. 2005;46:45-50.

Khodakovskaya, M.V., De Silva, K., Nedosekin, D.A., Dervishi, E., Biris, A.S., Shashkov, E.V., Galanzha, E.I., Zharov, V.P., 2011. Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 108(3): 1028-1033.

Kumar, V., Guleria, P., Kumar, V., Yadav, S.K., 2013. Gold nanoparticle exposure induces growth and yield enhancement in *Arabidopsis thaliana*. *Science of the Total Environment*. 461-462: 462-468.

Khodakovskaya, M., Dervishi, E., Mahmood, M., Xu, Y., Li, Z.R., Watanabe, F., Biris, A.S., 2009. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano*. 3(10): 3221- 3227.

Khene, L., Berrebbah, H., Yahyaoui, A., Bouarroudj, T., Zouainia, S., Kahli, H., Bouraiou, C., 2017. Biomarkers of oxidative stress, lipid peroxidation and ROS production induced by TiO<sub>2</sub> microparticles on snails *Helix aspersa*. *Studia Universitatis "Vasile Goldiș", Seria Științele Vieții*. 27(2): 127-133.

Keller, A.A., Wang, H., Zhou, D., Lenihan, H.S., Cherr, G., Cardinale, B.J., Miller, R., Ji, Z., 2010. Stability and aggregation of metal oxide nanoparticles in natural aqueous matrices. *Environmental Science & Technology*. 44: 1962-1967.

### L

Laware, S. L. & Raskar, S. Effect of Titanium Dioxide Nanoparticles on Hydrolytic and Antioxidant Enzymes during Seed Germination in Onion. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 3, 749–760 (2014).

Li, Y.F., & Chen. C., 2011. Pate and toxicity of metallic and metal-containing nanoparticles for biomedical applications. *Small*. 7: 2965-2980.

Leguillon, D., Laurencin, J., Dupeux, M., 2003. Failure initiation in an epoxy joint between two steel plates. *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 22 (4): 509-524.

## Références bibliographiques

---

Lugan, R. (2008). Phénotypage métabolique des réponses aux stress abiotiques chez *Arabidopsis thaliana* : analyse fonctionnelle et intégrative du métabolome (Doctoral dissertation, Rennes 1).

Li, J., Hu, J., Ma, C., Wang, Y., Wu, C., Huang, J., Xing, B., 2016. Uptake, translocation and physiological effects of magnetic iron oxide ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticles in corn (*Zea mays*L.). *Chemosphere*. 159: 326–334.

Lee, C.W., Mahendra, S., Zodrow, K., Li, D., Tsai, Y.C., Braam, J., Alvarez P.J., 2010. Developmental phytotoxicity of metal oxide nanoparticles to *Arabidopsis thaliana*. *environmental toxicology chemistry* 29(3): 669–675.

Lichtenthaler, H.K., 1987. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods in Enzymology*.148: 350-382.

Lee, W.M., An, Y.J., Yoon, H., Kweon, H.S., 2008. Toxicity and bioavailability of coppernanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*Phaseolus radiates*) and wheat (*Triticumaestivum*): plant agar test for waterinsoluble nanoparticles. *environmental toxicology chemistry*27: 1915–1921.

Limón Pacheco, J. H., Carballo, M. A., &Gonsebatt, M. E. (2017). Antioxidants against environmental factor-induced oxidative stress. *Nutritional Antioxidant Therapies: Treatments and Perspectives*, 189-215.

Liu-Bryan, R., &Lioté, F. (2005). Monosodium urate and calcium pyrophosphate dihydrate (CPPD) crystals, inflammation, and cellular signaling. *Joint Bone Spine*, 72(4), 295-302.

## Références bibliographiques

---

C. Laloi, K. Apel, A. Danon, Reactive oxygen signalling: The latest news, *Current Opinion in Plant Biology*. 7(2004) 323–328.

Lebachiche I., Benkadja S. 2019. Quantification du stress hydrique avec un modèle de culture sur quelque génotype de blé dur (*Triticum durum*), durant plusieurs campagnes en milieu semi-aride. Mémoire de master en biologie. Option Amélioration des plantes. Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi- B.B.A Algérie, 47p.

### M

Migdal, C., & Serres, M. (2011). Espèces réactives de l'oxygène et stress oxydant. *Médecine/sciences*, 27(4), 405-412.

Marano, F., & Guadagnini, R. (2013). Les nanoparticules dans l'alimentation : quels risques pour le consommateur ? *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 48(3), 142-150.

D.P. Maxwell, Y. Wang, L. McIntosh, the alternative oxidase lowers mitochondrial reactive oxygen production in plant cells, *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 96 (1999) 8271–8276.

Mekhlouf, A., Bouzerzour, H., Dehbi, F., & Hannachi, A. (2001). Rythme de développement et variabilité de réponses du blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux basses températures. Tentatives de sélection pour la tolérance au gel. In *Proceeding séminaire sur la valorisation des milieux semi-arides. Oum El Bouaghi* (Vol. 23, pp. 75-80).

Mbarek, K. B., & Boubaker, M. (2017). Manuel de grandes cultures-Les céréales. Éditions universitaires européennes.

## Références bibliographiques

---

R. Mittler, Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance, *Trends in Plant Science*. 7 (2002) 405–410.

Mittler R, Blumwald E (2010) Genetic engineering for modern agriculture: challenges and perspectives. *Annual Review of Plant Biology* 61:443–462

J.-L. Montillet, S. Chamnongpol, C. Rusterucci, J. Dat, B. Van De Cotte, J.-P. Agnel, C. Battesti, D. Inze, F. Van Breusegem, C. Triantaphylides, Fatty acid hydroperoxides and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in the execution of hypersensitive cell death in tobacco leaves, *Plant Physiol*. 138 (2005) 1516–1526.

Mammadov, JA., 1999. Evaluation of drought and salt resistance during the germination of selected durum wheat lines. *Turkish J. of Biology*. 23 : 177-186.

P. Muñoz and S. Munné-Bosch, “Photo-oxidative stress during leaf, flower and fruit development,” *Plant Physiology*, vol. 176, no. 2, pp. 1004–1014, 2018.

### N

G. Noctor, C.H. Foyer, Ascorbate and glutathione: Keeping active oxygen under control, *Annual Review of Plant Biology*.49 (1998) 249–279.

Nezzari, A., Sebbar, C., &Guergouri, K. (2020). Synthèse et caractérisation de nanoparticules de TIO<sub>2</sub> pur et dope.

Nair, P., Chung, I., 2014. Physiological and molecular level effects of silver nanoparticles exposure in rice (*oryza sativa* L.) seedlings. *Chemosphere*. 112: 105-113.

## Références bibliographiques

---

Nair, P.M., Kim, S., Chung, I.M., 2014. Copper oxide nanoparticle toxicity in mung bean (*vigna radiata* L.) seedlings: physiological and molecular level responses of in vitro grown plants. *Acta Physiologiae Plantarum* 36 (11): 2947-2958.

### O

Ostiguy, C., & IRSST (Québec). (2006). Les nanoparticules : connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en santé et en sécurité de travail. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail du Québec.

Oanzar S, (2012). Etude comparative de l'effet du semis direct et du labouage conventionnel sur le comportement du blé dur (*Triticum durum* Desf), mémoire pour obtenir de diplôme magister ; université Abed ALHAMID Ben Badis-Mostaghanem.p15.

Ondo, O. E. (2014). *Caractérisation d'une collection de variétés anciennes de blé pour leur réponse à la mycorhization et impact sur la qualité du grain* (Doctoral dissertation, Université de Bourgogne).

### P

Pincemail, J., Bonjean, K., Cayeux, K., & Defraigne, J. O. (2002). Mécanismes physiologiques de la défense antioxydante. *Nutrition clinique et métabolisme*, 16(4), 233-239.)

Prasad TNVKV, Sudhakar P, Sreenivasulu Y, Latha P, Munaswamy V, Raja Reddy K, Sreeprasad TS, Sajanlal PR, Pradeep T. Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of Peanut. *Journal of Plant Nutrition*. 2012; 35:905–927.

Pakrashi, S. et al. In Vivo Genotoxicity Assessment of Titanium Dioxide Nanoparticles by *Allium cepa* Root Tip Assay at High Exposure Concentrations. *PLoS ONE* 9, e87789 (2014).

## Références bibliographiques

---

Parent, C., Capelli, N., & Dat, J. (2008). Formes réactives de l'oxygène, stress et mort cellulaire chez les plantes. *Comptes Rendus Biologies*, 331(4), 255-261.

Pamplona, R., Costantini, D., 2011. Molecular and structural antioxidant defenses against oxidative stress in animals. *The American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 301, 843-863.

Pighini, C. (2006). Synthèses de nanocristaux de TiO<sub>2</sub> anatase à distribution de taille contrôlée. Influence de la taille des cristallites sur le spectre Raman et étude des propriétés de surface (Doctoral dissertation, Université de Bourgogne).

Pan, S. M., & Yau, Y. Y. (1992). Characterization of superoxide dismutase in *Arabidopsis*. *Taiwania*, 3.

Pelley, A.J., & Tufenkji, N., 2008. Effect of particle size and natural organic matter on the migration of nano and microscale latex particles in saturated porous media. *Journal of Colloid and Interface Science* 321: 74-83.

Poinso, A. (2016). *Recherche d'inhibiteurs de la superoxyde dismutase à partir de substances naturelles* (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).

### Q

Qafoku, N.P., 2010. Terrestrial nanoparticles and their controls on soil-/geo-processes and reactions. *Advances in Agronomy*. 107: 33-91.

### R

Reuben, P. M., Brogley, M. A., Sun, Y., & Cheung, H. S. (2002). Molecular mechanism of the induction of metalloproteinases 1 and 3 in human fibroblasts by basic calcium phosphate crystals: role of calcium-dependent protein kinase C $\alpha$ . *Journal of Biological Chemistry*, 277(17), 15190-15198.

Ramade F, (2003). Elément d'écologie écologique fondamentale. *Ed. Dunod, Paris*, 690p.

Rottman, J., Platt, L.C., Sierra-Alvarez R., Shadman, F., 2013. Removal of TiO<sub>2</sub> nanoparticles by porous media: Effect of filtration media and water chemistry. *The Chemical Engineering Journal*.217: 212-220.

Ruffini Castiglione, M., Giorgetti, L., Geri, C., & Cremonini, R. (2011). The effects of nano-TiO<sub>2</sub> on seed germination, development and mitosis of root tip cells of *Vicia narbonensis* L. and *Zea mays* L. *Journal of Nanoparticle Research*, 13, 2443-2449.

Ramel F, 2009. Implication des sucres solubles dans les réponses aux stress xénobiotique et oxydatif chez *Arabidopsis thaliana*. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 307 p.

Rajput, V. D., Harish, Singh, R. K., Verma, K. K., Sharma, L., Quiroz-Figueroa, F. R., ... & Mandzhieva, S. (2021). Recent developments in enzymatic antioxidant defence mechanism in plants with special reference to abiotic stress. *Biology*, 10(4), 267.

Rossano, M. (2014). Utilisation des nanoparticules de dioxyde de titane dans les émulsions cosmétiques : impact sur la santé humaine et l'environnement (Doctoral dissertation, Le Havre).

Raskar, S.V., Laware, S.L., 2014. Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. *International journal of current microbiology and applied sciences*. 3(2): 467–473.

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

D.M. Rhoads, C.C. Subbaiah, Mitochondrial retrograderegulation in plants, *Mitochondrion* 7 (2007) 177–194.

Rolland, Y. (2004). Antioxydants naturels végétaux. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 11(6), 419-424.

### S

Sies, H. (1997). Oxidative stress: oxidants and antioxidants. *Experimental Physiology: Translation and Integration*, 82(2), 291-295.

Sies H., Antioxidant in disease mechanisms and therapy, *Advances in Pharmacology, Academic Press, New York*, 1997, 38.

Stefanov K, Seizova K, Yanishlieva N, Marinova E, Popov S. Accumulation of Pb, Zn and Cd in plant seeds growing in metalliferous habitats in Bulgaria. *Food Chemistry*. 1995;54:311-313.

Schrand, A.M., Rahman, M.F., Hussain, S.M., Schlager, J.J., Smith, D.A., Syed, A.F., 2010. Metal-based nanoparticles and their toxicity assessment. *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*. 2: 544-568.

Shi, J., Abid, A.D., Kennedy, I.M., Hristova, K.R., Silk, W.K., 2011. To duckweeds (*Landoltia punctata*), nanoparticulate copper oxide is more inhibitory than the soluble copper in the bulk solution. *Environmental Pollution*. 159 (5): 1277–1282.

Smirnoff, N. (1998). Plant resistance to environmental stress. *Current opinion in Biotechnology*, 9(2), 214-219.

## Références bibliographiques

---

Stephenie, S., Chang, Y. P., Gnanasekaran, A., Esa, N. M., &Gnanaraj, C. (2020). An insight on superoxide dismutase (SOD) from plants for mammalian health enhancement. *Journal of Functional Foods*, 68, 103917.

Slama, A., Ben Salem, M., Ben Naceur, M., &Zid, E. (2005). Les céréales en Tunisie: production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. *Sécheresse*, 16(3), 225-229.

Sramková, Z., Gregová, E., &Šturdík, E. (2009). Chemical composition and nutritional quality of wheat grain. *Acta chimicaslovaca*, 2(1), 115-138).

Surget A, Barron C, (2005). Histologie du grain de blé. Industrie des céréales, n. 145, pp. 4-7.

Shewry, P. R., Evers, A. D., Bechtel, D. B., Abecassis, J., Khan, K., &Shewry, P. (2009). Development, structure, and mechanical properties of the wheat grain. *Wheat Chemistry and Technology*, 4th ed.; Khan, K., Shewry, P., Eds, 51-96.

Soltner, D. (2005). Les grandes productions végétales. 20ème Edition. *Collection science et techniques agricoles*. 472p.

Siegrist, R. L., Crimi, M. et Simpkin, T. J., éditeurs (2011). In Situ Chemical Oxidation for Groundwater Remediation, volume 3 de SERDP/ESTCP Environmental Remediation Technology. *Springer New York*, NY.

Slama A., Ben Salem M., Ben Naceur M., Zid E. 2005. Les céréales en Tunisie : Production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. Institut national de la recherche agronomique de Tunisie (Inrat). Univ. Elmanar. Tunisie. 16, 3, p.225-229.

### T

A. Torres, J.L. Dangel, Functions of the respiratory burst oxidase in biotic interactions, abiotic stress and development, *Current Opinion in Plant Biology*.8 (2005) 397–403

## Références bibliographiques

---

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.

Taiz L, Zeiger E (2006) *Plant physiology*, 4th edn. Sinaur Associates, Sunderland.

Tumburu, L., Andersen, C. P., Rygiewicz, P. T. & Reichman, J. R. Phenotypic and genomic responses to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles in Arabidopsis germinants: Arabidopsis response to TiO<sub>2</sub> and CeO<sub>2</sub> nanoparticle exposure. *Environmental Toxicology and Chemistry* 34, 70–83 (2015).

Takallu S, Davodi D, Omidi M, Ebrahimi MA, Rouzbeh F, Rasulnia AR. The effect of titanium dioxide nanoparticles on barley cytogenetical index, *Journal of Agricultural Biotechnology*. 2013;5(1):13-25

Triboulet, S. (2013). Etude des effets de deux types de nanoparticules métalliques sur des macrophages murins par une approche protéomique (Doctoral dissertation, Grenoble).

### V

Van Breusegem, F., & Dat, J. F. (2006). Reactive oxygen species in plant cell death. *Plant physiology*, 141(2), 384-390.

G. Vidal, M. Ribas-Carbo, M. Garmier, G. Dubertret, A.G. Rasmusson, C. Mathieu, C.H. Foyer, R. De Paepe, Lack of respiratory chain complex I impairs alternative oxidase engagement and modulates redox signaling during elicitor-induced cell death in tobacco, *Plant Cell* 19 (2007) 640–655.

### W

Watts, R. J. et Teel, A. L. (2006). Treatment of Contaminated Soils and Groundwater Using ISCO. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 10(1):2–9.

## Références bibliographiques

---

Watts, R. J., Sarasa, J., Loge, F. J. et Teel, A. L. (2005). Oxidative and Reductive Pathways in Manganese-Catalyzed Fenton's Reactions. *Journal of Environmental Engineering*, 131(1):158–164.

wardman p. et caneiasL.P ,chemistry an introduction radiation res,145,p,5326531,1996.

Wang, Z., Wang, S., Peijnenburg, W.J., 2016. Prediction of joint algal toxicity of nano-CeO<sub>2</sub>/nano-TiO<sub>2</sub> and florfenicol: Independent action surpasses concentration addition. *Chemosphere*. 156: 8–13.

Wu, S.G., Huang, L., Head, J., Chen, D.R., Kong, I.C., Tang, Y.J., 2012. Phytotoxicity of metal oxide nanoparticles is related to both dissolved metal ions and adsorption of particles on seed surfaces. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*. 3(4): 126.

### Y

YAHYAOU, A. (2021). Les effets de l'exposition aux nanoparticules sur la germination et le développement d'un modèle alternatif végétal (Doctoral dissertation, Université Badji Mokhtar de Annaba (Algérie)).

Yang, L., & Watts, D.J., 2005. Particle surface characteristics may play an important role in phytotoxicity of alumina nanoparticles. *Toxicology Letters* 158(2) : 122-132.

### Z

Zeyons, O., 2008. Etudes des interactions physicochimiques et biologiques entre des nanoparticules manufacturées et des bactéries de l'environnement. Thèse de doctorat. Université Paris VI - Pierre et Marie Curie. p 330.

Zegrari, D. 2014. Caractérisation morpho-physiologique et biochimique de sept génotypes de deux variétés de blé dur cultivé en Algérie. Mémoire de maîtrise en biotechnologie végétales. Option biologie et génomique végétales. Université Constantine 1 Algérie, 42p.

## Références bibliographiques

---

### Webographie :

FAO, (2017). <file:///C:/Users/tassili/Downloads/Documents/a-I7658f.pdf>

<https://www.fao.org/faostat/en/#home>

## Thème : Evaluation des effets des nanoparticules de TiO<sub>2</sub> sur le blé dur (*triticum durum*)

**Réalisé par :** Ayachi madjda  
Belmehboul meriem  
Dribi naziha

**Encadreur :** Dr. Khene Iyes  
Date de soutenance : 06/07/20223

### Résumé :

De nos jours, la détection des effets et des risques due aux nanoparticules métalliques sur l'environnement est devenu un sujet d'importance majeure. Parmi les principales cibles de ces NPs, il y'a les plantes, organismes qui sont en contact avec les trois milieux sol, eau et atmosphère. Dans le présent travail, nous avons choisi de suivre le développement des graines de blé exposées à des concentrations croissantes de nanoparticules de dioxyde de titane (50 ; 200 ; 800 ; 1600 ppm) pendant 14 jours, cela à travers l'évaluation d'une multitude de paramètres morpho-germinatifs, physiologiques et enzymatiques.

Ainsi, nous avons jugé important de nous focaliser sur la phytotoxicité des nanoparticules de dioxyde titane (NP-TiO<sub>2</sub>) sur la germination et sur le développement des plantules de blé dur *Triticum durum* Desf (longueur des racines, longueur des feuilles). Dans un second temps, nous avons choisie d'évaluer l'effet de ces NPs sur deux paramètres physiologiques qui sont la perméabilité membranaire et le taux des pigments chlorophylliens. Et nous avons fini par l'étude d'un paramètre qui indique le déclenchement du système de défense antioxydant via le suivi de l'activité catalase (CAT).

Nos résultats illustrent, une diminution du processus de germination ainsi qu'une diminution de la croissance racinaire et foliaire des graines de blé dur traités par les NPs de TiO<sub>2</sub> comparativement au graines témoins. Concernant les paramètres physiologiques nous avons également constaté une diminution dose dépendante du pourcentage de perméabilité membranaire et du taux des pigments chlorophylliens. D'un autre côté, nous avons mis en évidence une induction dose dépendante de l'activité catalase au niveau racinaire et foliaire.

Nous pouvons conclure, qu'en raison de leurs petites tailles et leur forte réactivité, les nanoparticules affectent négativement le développement des graines de blé dur et déclenchent potentiellement un stress oxydatif via la production d'espèce réactive de l'oxygène (ERO), toxique au niveau cellulaire.

**Mots clés :** *Triticum durum* Desf, TiO<sub>2</sub>, Nanoparticules, Stress Oxydatif.

### Abstract:

Nowadays, the detection of effects and risks due to metallic nanoparticles on the environment has become a subject of major importance. Among the main targets of these NPs, there are plants, organisms that are in contact with the three environments soil, water and atmosphere.

In the present work, we have chosen to follow the development of wheat seeds exposed to increasing concentrations of titanium dioxide nanoparticles (50; 200; 800; 1600 ppm) for 14 days, through the evaluation of a multitude morpho-germinative, physiological and enzymatic parameters.

Thus, we considered it important to focus on the phytotoxicity of titanium dioxide nanoparticles (NP-TiO<sub>2</sub>) on the germination and development of *Triticum durum* Desf durum wheat seedlings (length of roots, length of leaves), we chose to evaluate the effect of these NPs on two physiological parameters which are the membrane permeability and the level of chlorophyll pigments. And we ended up studying a parameter that indicates the triggering of the antioxidant defense system via the monitoring of catalase activity (CAT).

Our results illustrate a decrease in the germination process as well as a decrease in root and leaf growth of durum wheat seeds treated with TiO<sub>2</sub> NPs compared to control seeds. Regarding the physiological parameters, we also observed a dose-dependent decrease in the percentage of membrane permeability and the level of chlorophyll pigments. On the other hand, we have demonstrated a dose-dependent induction of catalase activity at the root and leaf level.

We can conclude that, due to their small size and high reactivity, nanoparticles negatively affect the development of durum wheat seeds and potentially trigger oxidative stress via the production of reactive oxygen species (ROS), toxic to cellular level.

**Keywords :** *Triticum durum* Desf, TiO<sub>2</sub>, Nanoparticules, Oxidative Stress.

### ملخص :

في الوقت الحاضر ، أصبح اكتشاف الآثار والمخاطر الناجمة عن الجسيمات النانوية المعدنية على البيئة موضوعًا ذا أهمية كبيرة . من بين الأهداف الرئيسية لهذه الجسيمات النانوية ، هناك نباتات وكنات حية على اتصال بالبيئات الثلاث التربة والمياه والغلاف الجوي.

في العمل الحالي ، قمنا بمتابعة تطور بذور القمح المعرضة لتركيزات متزايدة من جزيئات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية (50 ، 200 ، 800 ، 1600 جزء في المليون ) لمدة 14 يومًا ، من خلال تقييم معايير النمو المورفولوجية ، الفسيولوجية والآنزيمية.

وبالتالي ، اعتبرنا أنه من المهم التركيز على السمية النباتية للجسيمات النانوية لثاني أكسيد التيتانيوم ( NP-TiO<sub>2</sub> ) على إنبات وتطور شتلات القمح الصلب (*Triticum durum* Desf) طول الجنور ، طول الأوراق ) ثانيًا ، اخترنا تقييم تأثير هذه الجسيمات النانوية على اثنين من العوامل الفسيولوجية وهما نفاذية الغشاء ومستوى أصباغ الكلوروفيل . وانتهى بنا الأمر بدراسة إعدادات تشير إلى بدء تشغيل نظام الدفاع المضاد للأكسدة من خلال مراقبة نشاط الكاتالاز (CAT).

توضح نتائجنا انخفاضًا في عملية الإنبات بالإضافة إلى انخفاض في نمو الجنور والأوراق لبذور القمح الصلب المعالجة بـ TiO<sub>2</sub> مقارنة بالبذور الشاهدة ، فيما يتعلق بالمعيار الفسيولوجية ، لاحظنا أيضًا انخفاضًا يعتمد على الجرعة في النسبة المئوية لنفاذية الغشاء ومستوى أصباغ الكلوروفيل . من ناحية أخرى ، لقد أظهرنا الحث المعتمد على الجرعة لنشاط الكاتالاز على مستوى الجنور والأوراق.

يمكننا أن نستنتج أنه نظرًا لصغر حجمها وتفاعلها العالي ، فإن الجسيمات النانوية تؤثر سلبيًا على نمو بذور القمح القاسي ويمكن أن تؤدي إلى الإجهاد التأكسدي من خلال إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية (ERO/ROS) السامة على المستوى الخلوي.

**الكلمات المفتاحية:** *Triticum durum* desf, الجسيمات النانوية, TiO<sub>2</sub>, الإجهاد التأكسدي.