

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

EFFET DE LA NANOPARTICULE D'OXYDE D'ALUMINIUM SUR LA TOXICITÉ DU
CHROME HEXAVALENT EN CONTACT AVEC LE BIOINDICATEUR LEMNA MINOR

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

MAÎTRISE EN BIOCHIMIE

PAR

KINALENDELE MASSAMBA PRISCA

JANVIER 2025

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Dieu pour la grâce qu'il m'a accordée par Jésus-Christ, me permettant de commencer et d'achever mes études de maîtrise.

Mes remerciements particuliers et sincères vont à mon directeur de recherche, le Pr David Dewez, pour sa confiance, ses encouragements, ses conseils, et l'autonomie qu'il m'a offerte tout au long de ma maîtrise. Il m'a donné l'opportunité de faire partie de son équipe de recherche.

Je tiens à remercier de tout cœur mes parents biologiques Kinalendele Lutumba Xavier et Kinalendele Babaka Eugénie, pour tout leur amour, leurs sacrifices et leur immense soutien dans la réalisation de mes études en maîtrise.

Ma reconnaissance s'étend au couple pastoral Dominique et Hélène Ngoy, pour leur amour, leurs sacrifices, leur soutien, ainsi que leur encadrement qui me permettent de m'intégrer au Canada.

Je tiens également à remercier l'ancien directeur du programme de biochimie, Pr Marc Lussier, pour ses conseils précieux au début de ma maîtrise.

Un grand merci à mes frères et sœurs biologiques, dont l'amour et le soutien constant m'ont été d'un grand réconfort tout au long de ce parcours.

Ma reconnaissance va également à mes collègues de laboratoire, Asma Loumaizia qui m'a formé pour la culture de plantes *Lemna minor*, Roumaissa Djidja, Sindie Kéita, Amath Niasse, et Razika Bounsiar. Je remercie également le Pr Gwénael pour m'avoir formé à l'utilisation des instruments de Nanoqam, ainsi que Dimitri Doussiemo pour son aide précieuse dans l'interprétation des résultats FTIR.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous les membres du Centre Évangélique la Résurrection Montréal pour leur soutien et conseils tout au long de mes études. À toutes les personnes, nommées ou non, qui ont contribué, de près ou de loin à la réussite de ce projet et à l'aboutissement de ma maîtrise en biochimie, je vous adresse mes remerciements les plus sincères.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	viii
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	x
RÉSUMÉ.....	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Le chrome	3
1.1.1 Chrome Trivalent	4
1.1.2 Chrome hexavalent, sa source et sa toxicité.....	4
1.2 Nanoparticule d'oxyde d'aluminium (nano Al ₂ O ₃) et ses applications.....	7
1.2.1 Application de la nano Al ₂ O ₃ dans le domaine biomédical	7
1.2.2 Application de la nanoparticule d'oxyde d'aluminium comme adsorbant	8
1.2.3 L'adsorption du Cr(VI) par la nanoparticule d'oxyde d'aluminium.....	9
1.2.4 Toxicité connue de la nanoparticule d'oxyde d'aluminium.....	10
1.3 L'utilisation de biomarqueurs dans l'évaluation toxicologique	10
1.3.1 Modèle d'étude biologique : la plante <i>Lemna minor</i>	10
1.3.2 <i>Lemna minor</i> dans les études écotoxicologiques	11
1.4 La photosynthèse	12
1.4.1 Chloroplaste et la membrane de thylakoïde	12
1.4.2 Pigments photosynthétiques.....	13
1.4.3 Photosystèmes	14
1.4.4 La cinétique rapide et polyphasique de la fluorescence de la <i>Chl a</i>	15
1.5 Les espèces réactives d'oxygènes.....	18
CHAPITRE 2 MATÉRIEL ET MÉTHODES	19
2.1 Préparation du matériel.....	19
2.2 Exigences préliminaires et incubation de la plante <i>Lemna minor</i>	19
2.3 Préparation des solutions stock.....	21
2.3.1 Préparation de la solution Cr(VI).....	21

2.3.2	Préparation de la solution de la nano Al ₂ O ₃	21
2.4	Préparation de la culture contaminée.....	21
2.5	Expérience	22
2.5.1	Détermination de la croissance	22
2.5.2	Détermination de la teneur de pigments photosynthétiques	24
2.5.3	Mesure de la cinétique de fluorescence de la <i>Chl a</i>	25
2.5.4	Détermination des ERO (espèces réactives d'oxygène)	25
2.6	Caractérisation de la nano Al ₂ O ₃	26
2.6.1	Structure cristallographique	26
2.6.2	Groupements fonctionnels	26
2.6.3	Taille hydrodynamique et le potentiel Zêta	26
2.7	Analyse statistique.....	26
CHAPITRE 3 RÉSULTATS.....		27
3.1	Caractérisation physico-chimie de la nano Al ₂ O ₃	27
3.1.1	Structure cristallographique de la nano Al ₂ O ₃	27
3.1.2	Groupements fonctionnels de la nano Al ₂ O ₃	28
3.1.3	Taille hydrodynamique et le potentiel zêta	29
3.2	Évaluation sur la physiologie de la plante <i>Lemna minor</i>	32
3.2.1	Effet du Cr(VI) et de la nano Al ₂ O ₃ sur le phénotype de <i>Lemna minor</i>	32
3.2.2	Effet du Cr(VI) et de la nano Al ₂ O ₃ sur le pourcentage de taux d'inhibition de croissance	36
3.3	Effet du Cr(VI) et de la nano Al ₂ O ₃ sur la teneur en pigments photosynthétiques	37
3.4	Effet du Cr(VI) et de la nano Al ₂ O ₃ sur l'efficacité de la photosynthèse.....	40
3.5	Effet du Cr(VI) et nano Al ₂ O ₃ sur la production de ROS.....	44
CHAPITRE 4 DISCUSSION.....		45
4.1	Caractérisation de la nanoparticule.....	45
4.2	Évaluation sur la physiologie de plante	46
4.2.1	Effet du Cr(VI) et de la nano Al ₂ O ₃ sur la croissance.....	46
4.2.2	Effet sur du Cr(VI) et de la nano Al ₂ O ₃ les pigments photosynthétiques.....	49
4.2.3	Effet du Cr(VI) et de la nano Al ₂ O ₃ sur efficacité de la photosynthèse.....	50
4.2.4	Effet du Cr(VI) et de la nano Al ₂ O ₃ sur la production de ROS	51
CONCLUSION		52
ANNEXE A Données supplémentaires : Tests statistiques		54
RÉFÉRENCES.....		71

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Les structures chimiques de chromes hexavalents Cr(VI) et de chromes trivalents Cr(III) existant dans l'environnement.	5
Figure 1.2 : Les racines et les frondes de la plante <i>Lemna minor</i> cultivées au laboratoire du professeur David Dewez.	12
Figure 1.3 : Équation du processus de la photosynthèse.....	12
Figure 1.4 : Structure de chloroplaste	13
Figure 1.5 : Structure de la chlorophylle a et b	14
Figure 1.6 : Spectre d'absorption de pigments photosynthétiques.....	14
Figure 1.7 : Structure du photosystème II.....	15
Figure 1.8 : Courbe de la fluorescence polyphasique de la <i>Chl a</i>	17
Figure 2.1 : Culture contaminée des plantes <i>Lemna minor</i>	22
Figure 2.2 : Schéma de la mesure de la longueur de racines de plantes <i>Lemna minor</i> par le logiciel imageJ.....	24
Figure 2.3 : Schéma de la détermination de la teneur de pigments photosynthétiques.....	25
Figure 3.1 : Le spectre XRD de la nano Al ₂ O ₃ représentant la structure cristallographique de la nano Al ₂ O ₃	27
Figure 3.2 : Le spectre de FTIR de la poudre de nano Al ₂ O ₃ et de l'interaction entre la nano Al ₂ O ₃ et le Cr(VI) dans le milieu de culture.	28
Figure 3.3 : Sédimentation de la nano Al ₂ O ₃ à 100 mg/L dans le milieu de culture SIS.	31

Figure 3.4 : Changements dans le nombre de frondes et le poids frais de la plante <i>Lemna minor</i> exposée à différentes concentrations du Cr(VI) et de la nano Al ₂ O ₃ (les deux contaminants combinés et non combinés) après 7 jours d'incubations.....	32
Figure 3.5 : Longueur des racines des plantes <i>Lemna minor</i> traitées avec le Cr(VI) au jour zéro (jour 0) avant l'incubation.....	35
Figure 3.6 : Perte des racines des plantes <i>Lemna minor</i> traitées avec le Cr(VI) après sept jours d'incubation dans le milieu de culture.. ..	35
Figure 3.7: Effet de l'inhibition de la croissance causé par Cr(VI) et la nano Al ₂ O ₃ (combiné et non combiné) sur la croissance de la plante <i>Lemna minor</i>	36
Figure 3.8 : Changement dans la teneur de la <i>Chl a</i> , <i>Chl b</i> , ratio <i>Chl a/Chl b</i> et les caroténoïdes des plantes traitées avec le Cr(VI) et la nano Al ₂ O ₃ après 7 jours d'incubation.. ..	38
Figure 3.9 : Changement de la montée rapide et polyphasique de la cinétique de fluorescence de la <i>Chl a</i> de plantes <i>Lemna minor</i> causé par le Cr(VI) et la nano Al ₂ O ₃	40
Figure 3.10 : Production de ROS intracellulaire dans les plantes <i>Lemna minor</i> après 7 jours d'exposition à différentes concentrations du Cr(VI) (5 et 10 mg/L) et de la nano Al ₂ O ₃ (10 et 100 mg/L).....	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Composition du milieu SIS pour la culture de <i>Lemna minor</i>	20
Tableau 3.1 : Changements de la taille hydrodynamique et de potentiels zêta de la nano Al ₂ O ₃ caractérisée dans l'eau nanopure et dans le milieu de culture.....	30
Tableau 3.2 : Changement dans la longueur des racines des plantes <i>Lemna minor</i> traitées avec la nano Al ₂ O ₃ et le Cr(VI) au jour zéro (jour 0) et au septième jour (jour 7) après l'incubation.	34
Tableau 3.3 : Changement dans les différents paramètres photosynthétiques de plantes <i>Lemna minor</i> causé par le Cr(VI) et la nano Al ₂ O ₃	41

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

-CH ₃	Groupe méthyle
-CHO	Groupe aldéhyde
ATP	Adénosine triphosphate
CaCl ₂	Chlorure de calcium
CAT	Catalase
Cd(II)	Ions cadmium
<i>Chl</i>	Chlorophylle
<i>Chl a</i>	Chlorophylle a
<i>Chl b</i>	Chlorophylle b
Co(II)	Ions cobalt
Co(NO ₃)	Nitrate de cobalt
Cr	Chrome
Cr(III)	Chrome trivalent
Cr(VI)	Chrome hexavalent
CuSO ₄	Sulfate de cuivre
<i>Cx+c</i>	Caroténoïdes
DLS	Diffusion dynamique de la lumière
<i>E coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
EDTA	Éthylènediaminetétraacétique
ERO	Espèce réactive d'oxygène
FeCl ₃	Chlorure de fer
Fm	Fluorescence maximale
Fo	Fluorescence minimale
FTIR	Spectroscopie infrarouge à transformée de fourier
GSH	Glutathion
H ₂ O	Eau
H ₃ BO ₃	Acide borique
HCl	Acide chloridrique
K ₂ Cr ₂ O ₇	Dichromate de potassium

KH_2PO_4	Phosphate de monopotassium
MgSO_4	Sulfate de magnésium
Mn(II)	Ions manganèse
MnCl_2	Chlorure de manganèse
Na_2^-	Sodium
NaCO_3	Bicarbonate de sodium
NADPH	Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate
NaMoO_4	Molybdate de sodium
Nano Al_2O_3	Nanoparticule d'oxyde aluminium
NaNO_3	Nitrate de sodium
NaOH	Hydroxyle de sodium
Ni(II)	Ions nickel
Ni^{2+}	Ions nickel
Pb^{2+}	Ions plomb
PBS	Phosphate saline
PEA	Plant efficiency Analysis
pH	Potentiel d'hydrogène
POD	Activité peroxydase
PQ	Plastoquinone
PQH_2	Plastoquinone réduite
PS	Photosystème
PSI	Photosystème I
PSII	Photosystème II
QA	Quinone A
QB	Quinone B
ROS	Reactif oxygen species
SOD	Superoxyde dismutase
XRD	Diffraction de rayons X
ZnSO_4	Sulfate de zinc

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

%	pourcentage
$\mu\text{g/L}$	microlitre par litre
$\mu\text{g/mL}$	microgramme par millilitre
μM	micromolaire
cm	centimètre
L	litre
mg	milligramme
mg/kg	milligramme par kilogramme
mg/L	millilitre par litre
mM	millimolaire
mmol/L	millimole par litre
mv	millivolts
nm	nanomètre
rpm	tours par minute

RÉSUMÉ

Les avancées technologiques ont entraîné le développement de nanoparticules d'oxyde, dont leurs applications se retrouvent dans différents secteurs, comme, la pharmacie, l'agriculture et l'environnement. Certaines nanoparticules d'oxyde présentes dans l'environnement sont capables d'adsorber les polluants hautement toxiques. Mais peu d'études s'intéressent à l'impact de ces nanoparticules lorsqu'elles interagissent avec les différents polluants présents dans l'environnement, tel que le chrome hexavalent (Cr(VI)), un polluant extrêmement toxique, considéré par l'environnement Canada et la santé Canada, causant des problèmes majeurs dans l'environnement.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la nanoparticule d'oxyde d'aluminium (nano Al_2O_3), utilisée pour adsorber le Cr(VI) dans le traitement des eaux. La plante *Lemna minor* a été utilisée comme bioindicateur, pour évaluer la physiologie de la plante, qui était en interaction avec le mélange de la nano Al_2O_3 (10 mg/L et 100 mg/L) et du Cr(VI) (5 mg/L et 10 mg/L). Les résultats indiquent que la nano Al_2O_3 n'a pas d'impact sur la toxicité du Cr(VI), en fonction du poids frais de la plante, du nombre de frondes et de la longueur des racines. Toutefois, la nano Al_2O_3 a considérablement réduit ($p < 0,01$) la toxicité du Cr(VI), mesurée par l'inhibition du taux de croissance, par rapport au Cr(VI) seul à 10 mg/L. Bien que la toxicité ait diminué, le Cr(VI) est resté toxique. Une réduction (de manière non significative) de la *Chl a* a été observée dans le test contenant le Cr(VI) à 10 mg/L en présence de la nano Al_2O_3 à 100 mg/L. La nano Al_2O_3 n'a pas impacté la toxicité du Cr(VI) en fonction de l'efficacité de la photosynthèse. Les stratégies de traitements de l'eau qui utilisent la nano Al_2O_3 adsorbant le Cr(VI), ne changent pas les propriétés toxiques du Cr(VI). Ce travail permet d'évaluer les risques pour la santé et pourrait contribuer à développer des stratégies visant à réduire ces risques.

Mots clés: Cr(VI), nano Al_2O_3 , *Lemna minor*, pigments photosynthétiques, efficacité de la photosynthèse.

ABSTRACT

Technological advances have led to the development of oxide nanoparticles, whose applications are found in various sectors such as pharmaceuticals, agriculture, and the environment. Some oxide nanoparticles present in the environment are capable of adsorbing highly toxic pollutants. However, few studies focus on the impact of these nanoparticles when they interact with different pollutants in the environment, such as hexavalent chromium (Cr(VI)), an extremely toxic pollutant, recognized by Environment Canada and Health Canada as causing major environmental issues.

In this study, we focused on aluminum oxide nanoparticles (nano Al₂O₃), used to adsorb Cr(VI) in water treatment. The plant *Lemna minor* was used as a bioindicator to assess the plant's physiology when interacting with a mixture of nano Al₂O₃ (10 mg/L and 100 mg/L) and Cr(VI) (5 mg/L and 10 mg/L). The results demonstrate that nano Al₂O₃ has no impact on the toxicity of Cr(VI), based on the plant's fresh weight, number of fronds, and root length. However, nano Al₂O₃ significantly reduced ($p < 0.01$) the toxicity of Cr(VI), as measured by the inhibition of the growth rate, compared to Cr(VI) alone at 10 mg/L. Although the toxicity decreased, Cr(VI) remained toxic. A reduction (non-significant) in *Chl a* was observed in the test containing Cr(VI) at 10 mg/L with nano Al₂O₃ at 100 mg/L. Nano Al₂O₃ did not affect the toxicity of Cr(VI) based on photosynthetic efficiency. Water treatment strategies using nano Al₂O₃ to adsorb Cr(VI) do not alter the toxic properties of Cr(VI). This work helps assess health risks and could contribute to the development of strategies to reduce these risks.

Keywords: Cr(VI), nano Al₂O₃, *Lemna minor*, photosynthetic pigments, photosynthetic efficiency.

INTRODUCTION

La pollution environnementale constitue un problème majeur de nos jours. Elle peut être définie comme l'élévation de la concentration de matériaux indésirable dans l'air, l'eau et le sol au-delà de la limite permise (Singh *et al.*, 2022). Elle est également définie comme un agent indésirable dans l'environnement naturel ayant des effets néfastes sur les animaux et les plantes (Briffa *et al.*, 2020). Les métaux lourds sont des éléments naturellement présents ayant une densité plus élevée que celle de l'eau (Flora et Pachauri, 2010). Les ions métalliques du chrome, de l'arsenic, du plomb, du fer, du cadmium, du nickel, du mercure et du cobalt sont toxiques même en faibles quantités (Wu, M. *et al.*, 2016). Ces métaux lourds pénètrent dans le milieu aquatique et causent des problèmes sérieux dans l'environnement. Le développement rapide de l'industrialisation et l'urbanisation, associé à un taux de croissance démographique alarmant, entraîne la pollution à grande échelle des écosystèmes aquatiques par les rejets d'eaux usées industrielles et domestiques (Kakkalameli *et al.*). Le chrome hexavalent est la forme la plus toxique du chrome (Bhalerao et Sharma, 2015). L'agence de protection de l'environnement des États-Unis a classé le Cr(VI) parmi les dix-sept métaux et métalloïdes dangereux pour la santé humaine (Jobby *et al.*, 2018 ; Usman *et al.*, 2020). Plusieurs méthodes sont utilisées pour éliminer les métaux lourds ainsi que le Cr(VI) des eaux de surface (Borowiak-Resterna *et al.*, 2010 ; Kornilovich *et al.*, 2000 ; Soylak et Erdogan, 2006 ; Zhou *et al.*, 2007). Parmi lesquelles, l'adsorption par les nanoparticules a été utilisée dans certaines études telle que celles de (Farghali *et al.*, 2013 ; Goswami *et al.*, 2012 ; Koju *et al.*, 2018 ; Mahdavi *et al.*, 2013). Cette technique a été efficace en raison de sa grande efficacité d'élimination de polluants, de sa simplicité et de son faible coût (Wu, X.-W. *et al.*, 2010). L'application des nanoparticules comme adsorbants est devenue un domaine de recherche intéressant en raison de leur grande efficacité d'élimination des polluants (Sharma *et al.*, 2010). Grâce à leur taille nanométrique, ces particules possèdent une grande surface spécifique et un plus grand nombre de sites actifs pour interagir avec les espèces polluantes (Hristovski *et al.*, 2007 ; Khaleel *et al.*, 1999). La nanoparticule d'oxyde d'aluminium (nano Al₂O₃) fait partie des nanomatériaux utilisés pour éliminer les ions Cr(VI) (Sharma *et al.*, 2010 ; Shokati Poursani *et al.*, 2015). En plus de son utilisation comme adsorbant, nano Al₂O₃, est également employée dans le domaine biomédical, pour l'administration des médicaments (Borbane *et al.*, 2015), ainsi que dans la détection de certaines molécules (Ito *et al.*, 2017). Chez les plantes, elle favorise leur croissance (Juhel *et al.*,

2011). Mais peu d'informations existent sur l'impact de l'interaction du Cr(VI) et la nano Al₂O₃. Il a été rapporté que la nano Al₂O₃ diminue la toxicité du cuivre chez *Scenedesmus obliquus*, tandis qu'une autre étude a montré que, la nano Al₂O₃ pourrait augmenter la toxicité du plomb chez *Isochrysis galbana*. Est-ce que nano Al₂O₃ pourrait réduire ou augmenter la toxicité du Cr(VI) dans le milieu aquatique ? L'hypothèse de ce travail est que la nano Al₂O₃ diminuerait ou augmenterait la toxicité du Cr(VI) dans le milieu aquatique. Pour répondre à cette problématique, la plante *Lemna minor*, connue sous le nom de lentille d'eau, est utilisée dans les études écotoxicologiques en raison de sa croissance rapide, sa structure simple, sa sensibilité à l'action d'un polluant et sa capacité à accumuler les polluants dans ses tissus (Radić *et al.*, 2011).

Ce travail vise à évaluer comment la nanoparticule d'oxyde (nano Al₂O₃) influence la toxicité du chrome hexavalent (Cr(VI)) lorsqu'il est en interaction avec la plante *Lema minor*, en examinant les paramètres physiologiques clés. Pour répondre à cet objectif, le premier sous-objectif est de caractériser les propriétés physico-chimiques de la nano Al₂O₃, comme son degré de cristallinité, les groupements fonctionnels à la surface de la nano Al₂O₃, la taille hydrodynamique de la nano Al₂O₃ en présence et l'absence du Cr(VI) en solution, ainsi que le potentiel zêta.

Le deuxième sous-objectif de ce travail est d'évaluer les effets toxiques du Cr(VI) sur la physiologie de la plante *Lemna minor* en présence et en absence de la nano Al₂O₃. Nous avons également évalué l'effet de la nano Al₂O₃ sans être en interaction avec le Cr(VI) sur la physiologie de la plante *Lemna minor*. Deux concentrations du Cr(VI) (5 et 10 mg/L) et deux de la nano Al₂O₃ (10 et 100 mg/L) ont été étudiées pour évaluer les paramètres physiologiques de la plante *Lemna minor*, notamment : le poids frais de la plante, le nombre de frondes, la longueur des racines, la teneur en pigments photosynthétiques (*Chl a*, *Chl b*, *Cx+c*), le niveau des espèces réactives d'oxygène (ERO) et l'efficacité de la photosynthèse.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Les métaux lourds sont des éléments qui sont caractérisés par une densité spécifique de plus de 5 g/cm^3 (Leonard *et al.*, 2004). Ils appartiennent principalement aux éléments de transition dans le tableau périodique (Bharti et Sharma, 2022). Les métaux lourds figurent parmi les polluants qui affectent considérablement l'environnement (Awan *et al.*, 2019), et sont naturellement soumis à des cycles biogéochimiques qui déterminent leur présence et leur concentration dans les compartiments environnementaux tels que le sol, l'eau, l'air et les organismes vivants. Mais l'intervention de l'homme peut considérablement changer leurs concentrations dans ces différents compartiments et altérer leurs distributions (Contreras-Bustos *et al.*, 2022). En raison des applications industrielles, domestiques, agricoles, médicales, technologiques ou d'évènement comme les explosions volcaniques et l'altération des roches, les métaux lourds sont libérés dans l'écosystème (Bharti et Sharma, 2022). Ils sont non biodégradables et persistent dans l'environnement pendant de milliers d'années (Almehdi *et al.*, 2019; Kushwaha *et al.*, 2018). Ils exercent un effet néfaste sur les plantes, les humains et les animaux, ce qui les classe parmi les polluants et en fait l'un des problèmes les plus importants (Bharti et Sharma, 2022). Dans l'écosystème, ils forment une chaîne de contamination de manière cyclique : industrie, atmosphère, sol, eau, nourriture et humain (Holmes *et al.*, 2008). Le chrome (Cr), l'arsenic (As), le plomb (Pb), le fer (Fe), le cadmium (Cd), le nickel (Ni), le mercure (Hg) et le cobalt (Co) sont des ions métalliques toxiques même en petites quantités (Wu, M. *et al.*, 2016). Ces métaux lourds deviennent létaux lorsque leur ingestion est excessive et lorsqu'ils ne sont pas métabolisés par le corps, s'accumulant alors dans l'espace intra ou extracellulaire des organes du corps (Briffa *et al.*, 2020; Flora et Pachauri, 2010).

1.1 Le chrome

Le chrome est classé comme le vingt-quatrième élément et est un métal de transition situé dans le groupe VI dans le tableau périodique (Cervantes *et al.*, 2001). Il figure parmi les métaux lourds, et se trouve dans la nature principalement sous forme de minerai de chromite FeCr_2O_4 dans lequel, il est dans son troisième état d'oxydation (Shupack, 1991). Il (chrome) est le dix-septième élément le plus abondant dans le manteau terrestre (Bhalerao et Sharma, 2015). Le sol peut contenir entre

5 et 3000 µg de chrome par gramme (Shewry et Peterson, 1976), sa production mondiale est dans l'ordre de 10^7 tonnes par an, 60 % à 70 % du chrome sont utilisés dans les alliages, notamment l'acier inoxydable, 15 % sont utilisés dans les procédés industriels chimiques, principalement dans le tannage du cuir, les pigments et la galvanoplastie (Papp et Knoerr, 1985; Stern, 1982). Dû à son utilisation, le chrome est un polluant sérieux de l'air, du sol et de l'eau (Armieta-Hernández et Rodríguez-Castillo, 1995; Khasim *et al.*, 1989). Le chrome pénètre dans l'écosystème aquatique à travers les effluents rejetés par les tanneries, les industries textiles, la galvanoplastie, la finition des métaux, l'exploitation minière, les industries de teinture et d'impression, la céramique, ainsi que les industries photographiques et pharmaceutiques, etc. (Abbas et Ali, 2007).

Le chrome se trouve sous différentes formes de valence entre -2 et +6 (Lauwerys *et al.*, 2007). Les formes les plus stables du chrome sont le chrome 0 (Cr(0)), le chrome trivalent (III) et le chrome hexavalent (VI). Le Cr (0) est la forme métallique du chrome produit dans les industries et il est un solide avec un point de fusion élevé, généralement utilisé pour la fabrication de l'acier et d'autres alliages (Bhalerao et Sharma, 2015). Les formes les plus connues du chrome sont le chrome trivalent et le chrome hexavalent (Shanker *et al.*, 2005).

1.1.1 Chrome Trivalent

Le chrome trivalent (Cr(III)) est le troisième état d'oxydation de chrome, il est un élément de trace essentiel dans la nutrition humaine, et également impliqué dans le métabolisme du glucose (Anderson et Kozlovsky, 1985). Il est relativement immobile, peu soluble, et moins ou non toxique (Kotaš et Stasicka, 2000). Il est trouvé dans l'organisme vivant et ne possède pas la capacité de traverser facilement la membrane cellulaire (Mertz, 1993), et possède une faible réactivité (Bhalerao et Sharma, 2015). Grâce à son faible réactivité et de leur absorption limitée par le système gastro-intestinal, il est utilisé comme marqueurs dans l'étude de procédé de digestion (Furnival *et al.*, 1990).

1.1.2 Chrome hexavalent, sa source et sa toxicité

Le chrome hexavalent (Cr(VI)) est le sixième état d'oxydation du chrome, il est introduit dans l'environnement par les activités industrielles. Il est considéré comme la forme la plus toxique du chrome en raison de sa grande solubilité et de sa mobilité dans l'eau (Bhalerao et Sharma, 2015).

Il est généralement associé à l'oxygène sous forme d'ions chromate (CrO_4^{2-}) ou dichromate ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (Cervantes *et al.*, 2001) (figure 1.1). Il est cinq cents fois plus toxique que le Cr(III), et il est également connu pour être cancérigène et tératogène (Acar et Malkoc, 2004; Bhattacharya *et al.*, 2008). Il provoque une perforation de la cloison nasale, une nécrose tubulaire rénale, une bronchite, une dermatite et des vomissements (Acar et Malkoc, 2004). Le Cr(VI) pénètre facilement la membrane biologique, réagit avec les composants de protéines et acide nucléique à l'intérieur de la cellule, et est désoxygéné en Cr(III), cette réaction avec le matériel génétique confère au Cr(VI) les propriétés cancérigènes (Bhalerao et Sharma, 2015).

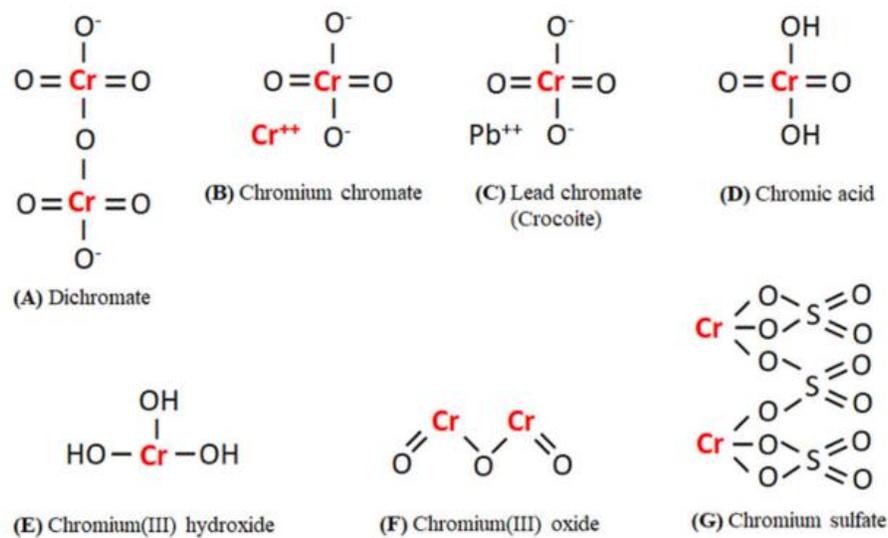


Figure 1.1 : Les structures chimiques de chromes hexavalents Cr(VI) (A-D) et de chromes trivalents Cr(III) (E-G) existant dans l'environnement. Cr, O, Pb, H, S représente le chrome, l'oxygène, le plomb, l'hydrogène et le soufre, respectivement (Srivastava *et al.*, 2021).

Chez les plantes, le Cr(VI), est absorbé par le transporteur de sulfate (Xu *et al.*, 2021), il est très toxiques pour les plantes et inhibe diverses activités morphologiques, physiologiques et métaboliques des plantes, et peut même entraîner des dommages complets (Chandra et Kulshreshtha, 2004; Shanker *et al.*, 2005). Certaines études ont montré que le Cr (VI) a limité le taux de germination de *Hibiscus esculentus* (Amin *et al.*, 2013), et de *Triticum aestivum* (Riaz *et al.*, 2019). Chez deux plantes douces dont *Lemna minor* et *Pistia statiotes* cultivées dans le milieu de culture dans une solution contenant le Cr(VI) à 5 ou 10 mg/L, les deux plantes ont montré un

retard de croissance (Bassi *et al.*, 1990). La germination des graines de *Salvia sclarea L.* a été inhibée lorsqu'elles ont été traitées avec différentes concentrations du Cr(VI) allant de 1 à 10 mg/L (Corradi *et al.*, 1993). Le Cr(VI) affecte aussi la croissance des racines, avec une concentration de 6, 12, 18 et 24 mg/kg le Cr(VI) a causé la réduction de longueur des racines ainsi que le poids sec des racines de *T. aestivum* (Ghani *et al.*, 2015). Il a également réduit la croissance des racines d'*Oryza sativa L.*, avec une concentration de 200 mg/L (Sundaramoorthy *et al.*, 2010).

La toxicité du Cr(VI) est aussi connue en affectant la surface foliaire totale ainsi qu'à réduisant le nombre de feuilles par plante chez *O. sativa* (Sundaramoorthy *et al.*, 2010). Une diminution du nombre de feuilles a été également rapportée chez *Prosopis laevigata* sous une toxicité de 3,4 mM de Cr(VI) dans le milieu de culture (Buendía-González *et al.*, 2010). Chez *Lolium perenne L.*, un flétrissement a été observé sous une toxicité de 0,5 0 mM de Cr(VI) préparé dans le milieu de culture (Vernay *et al.*, 2007). La chlorose des feuilles et la nécrose des feuilles ont été observées chez *Saccharum officinarum* après une exposition à 40 mg/kg et 80 mg/kg du Cr(VI), respectivement (Radha Jain *et al.*, 2000).

Le Cr(VI) entraîne la dégradation des pigments photosynthétiques, responsable de la capacité de collecte de la lumière (Srivastava *et al.*, 2021). Une exposition de 0,05 mg/L du Cr(VI) a entraîné une réduction du taux photosynthétique chez *M. spicatum* (Guilizzoni *et al.*, 1984). Une teneur plus faible en chlorophylle b (*Chl b*) que la chlorophylle a (*Chl a*) a été observée chez le blé traité au Cr(VI) par rapport aux plantes témoins (Subrahmanyam, 2008). Chez *Chlorella pyrenoidosa*, les contenus en *Chl a* et b ont tous deux diminués sous une exposition de 0,1 - 50 mg/L de Cr(VI) (Hörscik *et al.*, 2007). Le complexe collecteur de la lumière du photosystème II (PSII) a été fortement affecté chez *T. aestivum* après un traitement avec 0,010 mM, 0,20 mM du Cr(VI) (Mathur, S *et al.*, 2016).

Il a été rapporté des dommages chromosomiques dus à des traitements au Cr(VI) (0,01 mM et 0,1 mM) ont été signalés dans les tissus de *Amaranthus viridis*, où il régulait l'activité de la calmoduline, responsable de l'activation de nombreuses enzymes clés telles que la phospholipase et la kinase nicotinamide adénine dinucléotide, impliquées dans le mouvement chromosomique (Zou *et al.*, 2006).

1.2 Nanoparticule d'oxyde d'aluminium (nano Al₂O₃) et ses applications.

La nano Al₂O₃ se classe parmi les nanomatériaux qui possèdent différentes applications biomédicales grâce à leurs caractéristiques physico-chimiques et structurales exceptionnelles telles que la résistance à l'usure, aux produits chimiques, aux contraintes mécaniques ainsi que leur propriété optique favorable et une vaste surface poreuse, aussi en raison de leur faible coût et leur préparation facile. (Hassanpour *et al.*, 2018).

1.2.1 Application de la nano Al₂O₃ dans le domaine biomédical

La nano Al₂O₃ a été utilisée comme antimicrobien, où elle a été trouvée, avec une concentration de 100 µg/mL de retarder la croissance des bactéries (Sadiq *et al.*, 2009). La même étude a quantifié les protéines extracellulaires, qui étaient de 7,75 µg/mL chez le *E. coli* contrôle, mais l'interaction de la nano Al₂O₃ avec le *E. coli* a rendu la quantité des protéines à 5,9 µg/mL. Il a été proposé que les nanoparticules possédant une charge positive se lieraient avec la membrane cellulaire de gramme négative par une attraction électrostatique (Thill *et al.*, 2006).

La nano Al₂O₃ a été employée pour améliorer l'administration orale de Telmisartan, qui est un médicament anti-tension artérielle (Borbane *et al.*, 2015; Hassanpour *et al.*, 2018). Le médicament a été chargé à l'intérieur de la nano Al₂O₃, qui a entraîné une dissolution et une libération significative du Telmisartan (Borbane *et al.*, 2015). La nano Al₂O₃ a également été utilisée pour améliorer la biodisponibilité d'ibuprofène (Tarlani *et al.*, 2017).

La nano Al₂O₃ a été considéré comme une nouvelle plateforme pour la détection de différentes molécules (Hassanpour *et al.*, 2018). Elle a été utilisée pour la détection de l'albumine sérique bovine sur la surface de résonance de plasmon localisé, qui a été modifiée avec la nano Al₂O₃ (Ito *et al.*, 2017). La nano Al₂O₃ a également été modifiée avec la nanocarbone pour la détection de l'ADN (Aramesh *et al.*, 2017). Elle a aussi été employée avec la cytosine dans la détection de molécules phénolique (Liu *et al.*, 2011).

La nano Al₂O₃ a été utilisée dans le traitement de cancer, où le nanomatériau d'oxyde d'aluminium sous forme de nanotubes contenant la thapsigarin, a été coadministré avec un inhibiteur de

l'autophagie à savoir la 3-méthyladenine, pour cibler la signalisation de l'autophagie dans les cellules humaines cancéreuses et normales (Wang, Y. *et al.*, 2015).

1.2.2 Application de la nanoparticule d'oxyde d'aluminium comme adsorbant

La pollution des eaux par les métaux lourds est un problème crucial qui peut être réduit par des méthodes telles que la précipitation, l'ultrafiltration, l'électrodéposition, l'osmose inverse, les traitements électrochimiques, la filtration par membranes, l'évaporation, la flottation, les réactions d'oxydation-réduction et la biosorption (Afkhami *et al.*, 2011; Caliman *et al.*, 2011; Recillas *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2011), mais ces procédés présentent des inconvénients tels que des coûts élevés, la génération de polluants secondaires et une faible efficacité de dépollution (Mahdavi *et al.*, 2013).

L'utilisation de nanoparticules dans le processus de sorption est devenue plus attrayante pour de nombreux scientifiques en raison de leurs propriétés uniques (Rahmani *et al.*, 2010). Les oxydes métalliques, en particulier ceux de fer et d'aluminium, sont d'excellents adsorbants pour l'élimination des anions des solutions aqueuses (Golestanifar *et al.*, 2015). La nanoparticule d'oxyde d'aluminium fait partie des nanoparticules les plus étudiées, capables de retirer les ions de métaux lourds des solutions aqueuses grâce à leur grande surface spécifique, leur haute capacité de sorption et leur résistance mécanique (Zhang, L. *et al.*, 2008). Les anions chargés négativement sont adsorbés sur la surface chargée positivement des oxydes métalliques par attraction électrostatique (Kumar *et al.*, 2011).

Gamma nano Al_2O_3 a été utilisée pour éliminer la méthyle bleu dans une solution, la capacité maximale d'adsorption était de 175,4 mg/g à 45 °C (Sangor et Al-Ghouti, 2023). Une capacité maximale d'adsorption du phénol par gamma nano Al_2O_3 de 16,97 mg/g, a été constatée dans l'étude de (Safwat *et al.*, 2022). Une autre étude a trouvé que la nano Al_2O_3 pouvait éliminer 89,67 % de l'arsénite d'une solution aqueuse (Prabhakar et Samadder, 2018), de plus Ghosh et ses collègues ont testé l'efficacité de la nano Al_2O_3 , préparée pour éliminer l'arsenic dans les eaux souterraines contaminées, et ont constaté une efficacité d'élimination de 94,63 % (Ghosh *et al.*, 2019). La nano Al_2O_3 a été modifiée avec de l'acide humique, un extrait de coquille de noix et du 1,5 - diphénylcarbazon pour augmenter la capacité de complications avec les métaux lourds, pour l'élimination de Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} à partir d'une solution aqueuse. Les valeurs maximales

d'adsorptions pour les trois métaux lourds dans la solution étaient de 92,0 mg/g 97,0 mg/g et 63,8 mg/g pour de l'acide humique, l'extrait de coquille de noix et du 1,5- diphénylcarbazon respectivement (Mahdavi *et al.*, 2015). La structure de la nano Al_2O_3 peut être modifiée afin d'augmenter la capacité d'adsorption. Une étude faite sur la nano Al_2O_3 modifiée avec le glycérol pour l'élimination d'ions cadmium. L'efficacité de l'élimination des Cd^{2+} était supérieure à 99 % (Koju *et al.*, 2018). Dans une autre étude, la nano Al_2O_3 a été modifiée avec 2,4 dinitrophénylhydrazine pour éliminer les métaux lourds tels que le Pb(II), Cr(III), Co(II), Ni(II) and Mn(II) à partir des échantillons d'eau. Le résultat a montré que l'adsorbant possède la plus grande capacité d'adsorption pour le Pb(II), Cr(III) et Cd(II) dans un système de mélange d'ions (Afkhami *et al.*, 2010).

1.2.3 L'adsorption du Cr(VI) par la nanoparticule d'oxyde d'aluminium

Le mécanisme d'adsorption du Cr(VI) repose sur le fait que les ions négativement chargés de différentes formes de Cr(VI) telles que CrO_4^{2-} , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, HCrO_4^- sont adsorbés à la surface de la nano Al_2O_3 positivement chargées par attraction électrostatique (Golestanifar *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2011). Sharma et ses collègues ont étudié l'élimination du Cr(VI) dans le milieu aquatique en utilisant la poudre la nano Al_2O_3 . Avec une concentration de Cr(VI) allant de 0,03 à 0,019 mmol/L, ils ont constaté que le pourcentage de la réduction du Cr(VI) diminuait avec un temps de contact de 60 minutes, qui était suffisant pour l'élimination maximale du Cr(VI). Ils ont également constaté qu'en variant le pH de la solution, de la plage acide à la plage alcaline, l'efficacité de l'adsorption diminuait de 92,2 % à 60,8 %. À un pH de 2,0, ils ont obtenu une élimination maximale. Une l'augmentation de la température de 25 à 45 °C diminuait l'élimination du Cr(VI) (Sharma *et al.*, 2010). Une autre étude de l'adsorption de quatre métaux lourds dont le Cr(VI) le nickel (Ni^{2+}), le plomb (Pb^{2+}), cadmium (Cd^{2+}) faite avec l'alpha Al_2O_3 , a conduit à une bonne capacité d'adsorption du Cr(VI) et du Pb^{2+} (Shokati Poursani *et al.*, 2015). Une autre étude a comparé l'élimination du Cr(VI) entre la nano Al_2O_3 et la nanocuiivre. La nano Al_2O_3 a montré une bonne capacité d'élimination comparée au nanocuiivre (Bhusari *et al.*, 2016), mais rien n'a été dit sur le mécanisme d'adsorption de la nano Al_2O_3 dans leur étude. L'ajout de la nano Al_2O_3 a considérablement augmenté la performance de la membrane fabriquée avec le styrène-butadiène-styrène, pour sa capacité à traiter de l'eau contenant du sel (NaCl) et des métaux lourds comme Cr(VI), Cd, Pb (Khraisheh *et al.*, 2021).

1.2.4 Toxicité connue de la nanoparticule d'oxyde d'aluminium

Malgré des applications biomédicales répandues, la nano Al_2O_3 a démontré une toxicité environnementale (Hassanpour *et al.*, 2018). Certaines études se sont concentrées sur l'évaluation de la cytotoxicité de la nano Al_2O_3 sur divers organismes (Hassanpour *et al.*, 2018). Vinardell P.M dans leur étude ont montré que la nano Al_2O_3 peut lyser les érythrocytes par rapport à l' Al_2O_3 de taille macroscopique dans des échantillons de sang humain, de rat et de lapin. La nanopoudre a induit une hémolyse plus intense dans ces échantillons, démontrant le risque de contamination sanguine par la nano Al_2O_3 en tant que nanomatériaux puissants provoquant la lyse (Vinardell Martínez-Hidalgo *et al.*, 2015). La neurotoxicité de la nano Al_2O_3 a été démontrée chez *Drosophila melanogaster*, où, la nano Al_2O_3 pourrait interrompre les activités rythmiques neuronales dans le lobe antennaire. Une découverte importante a été que la neurotoxicité de la nano Al_2O_3 n'est apparue qu'après 15 minutes d'administration (Huang *et al.*, 2013). La toxicité de la nano Al_2O_3 a également été trouvée chez *Ceriodaphnia dubia*, où le niveau de contamination de l'eau par la Al_2O_3 a directement été corrélé à la cytotoxicité observée chez *Ceriodaphnia dubia*, laquelle a été déduite de la biodisponibilité des nanoparticules à l'intérieur de cet organisme. La nano Al_2O_3 peut réduire le taux de croissance de *Ceriodaphnia dubia* par l'induction d'un stress oxydatif (Pakrashi *et al.*, 2013). Une autre étude sur les algues, a montré l'impact de la nano Al_2O_3 sur la toxicité de Pb, où la présence de la nano Al_2O_3 a significativement augmenté la bioabsorption du Pb. Et à l'intérieur de la cellule, le Pb chargé sur la nano Al_2O_3 pourrait être plus toxique que la même quantité du Pb libre (Hu *et al.*, 2018).

1.3 L'utilisation de biomarqueurs dans l'évaluation toxicologique

1.3.1 Modèle d'étude biologique : la plante *Lemna minor*

La plante *Lemna minor* est une petite plante aquatique flottante appartenant à la famille de *Lemnaceae* (Cheng *et al.*, 2002), elle est connue pour sa haute productivité et son contenu élevé en protéines dans les climats tempérés (Ozengin et Elmaci, 2007). Elle est de couleur verte et de petite taille (1-3 mm), possède également des racines courtes, mais denses (1-3 cm) (Altay *et al.*, 1996). Les frondes de la plante *Lemna minor* poussent en colonies qui dans les conditions de croissance particulières forment un tapis dense et uniforme à la surface (Hasar *et al.*, 2000). La plante est une

source de nourritures pour les oiseaux et un abri pour les petits invertébrés aquatique(Gülçin, I., Kireççi, Ekrem, Akkemik, Ebru, Topal, Fevzi et Hisar, 2010; Tkalec *et al.*, 1998).

1.3.2 *Lemna minor* dans les études écotoxicologiques

L'analyse chimique est généralement insuffisante pour fournir des informations sur la qualité de l'eau, car les polluants sont présents en grand nombre dans les eaux de surface et souvent à des concentrations trop faibles pour permettre une détermination analytique (Radić *et al.*, 2011). De plus, il est impossible de prédire les propriétés toxiques et/ou génotoxiques des échantillons d'eaux complexes en utilisant une approche physico-chimique (Radić *et al.*, 2011). Par conséquent, il est essentiel d'utiliser des systèmes de tests biologiques avec des cellules vivantes ou des organismes qui donnent une réponse globale au mélange complexe de produits chimiques sans aucune connaissance préalable de la composition du mélange ou de ses propriétés chimiques (Radić *et al.*, 2011). Les tests sur les plantes sont très sensibles aux nombreux polluants environnementaux, y compris les métaux lourds (Fiskesjö, 1985), et ont été utilisés pour surveiller les effets synergiques potentiels des mélanges de polluants (Wang et Freemark, 1995). La plante *Lemna minor* est utilisée dans les études sur la qualité de l'eau pour surveiller les métaux lourds et d'autres polluants aquatiques, car *Lemna minor* comme d'autres plantes aquatiques, peut accumuler sélectivement certains produits chimiques et peut servir de bioindicateur (Radić *et al.*, 2011). *Lemna minor* possède de propriétés physiologiques telles que la petite taille, taux de multiplication élevée et propagation. Ce qui en fait un système de test idéal (Radić *et al.*, 2011). En plus des paramètres de croissance, les indicateurs les plus couramment évalués dans les systèmes de tests d'écotoxicologie sont les teneurs en chlorophylle et en caroténoïdes ainsi que les activités enzymatiques telles que la peroxydase(Mohan et Hosetti, 1999).

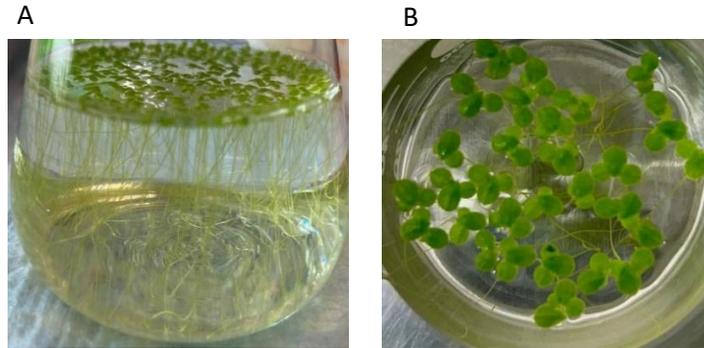


Figure 1.2 : Les racines (A) et les frondes (B) de la plante *Lemna minor* cultivées au laboratoire du professeur David Dewez.

1.4 La photosynthèse

La photosynthèse est le processus par lequel les plantes capturent l'énergie du soleil et la convertissent en énergie biochimique, qui est ensuite utilisée pour soutenir presque toute la vie sur la terre (Evans, 2013). Le processus de la photosynthèse commence dans la membrane des thylakoïdes avec deux réactions lumineuses se produisant simultanément aux centres réactionnels des photosystèmes (PS). L'énergie lumineuse absorbée par les complexes pigments-protéines des antennes des PS est convertie, avec une très grande efficacité, en énergie chimique redox, cependant, une petite partie est dissipée sous forme de fluorescence de la chlorophylle (Latimer *et al.*, 1956). De plus l'eau est oxydée en oxygène. Le NADP^+ est réduit en NADPH, et en plus de l'ATP est produite (Shevela et Bjorn, 2018; Stirbet *et al.*, 2020).



Figure 1.3 : Équation du processus de la photosynthèse (Stirbet *et al.*, 2020).

1.4.1 Chloroplaste et la membrane de thylakoïde

Le chloroplaste est un grand organe avec une structure complexe comportant deux membranes externes appelées enveloppe chloroplastique et un troisième système de membrane interne largement replié thylakoïde (Arvidsson et Sundby, 1999). Le chloroplaste est un organe vital des

cellules photosynthétiques chez les algues et les plantes supérieures, agissant comme fournisseurs des sources de carbone et d'énergie (Gao *et al.*, 2018). Les thylakoïdes sont les membranes internes des chloroplastes et des cyanobactéries, ils constituent la plateforme pour les réactions lumineuses de la photosynthèse (Pribil *et al.*, 2014).

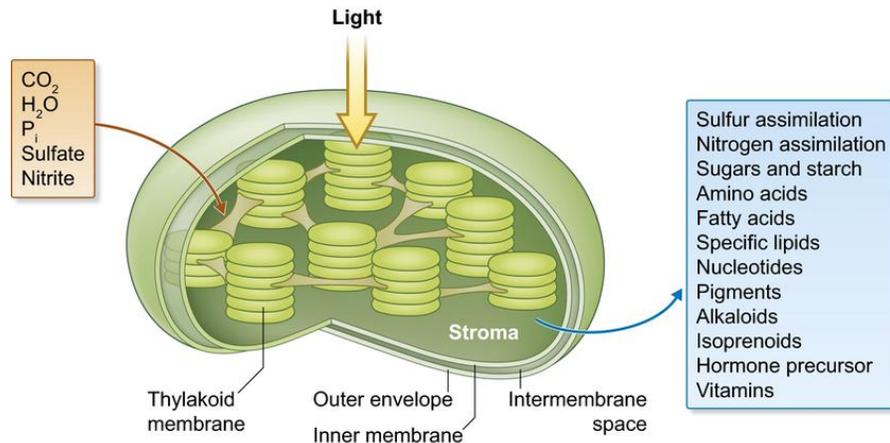


Figure 1.4 : Structure de chloroplaste (Kirchhoff, 2019).

1.4.2 Pigments photosynthétiques

Les pigments photosynthétiques sont les pigments utilisés pour absorber l'énergie lumineuse. Parmi ces pigments, il y a la chlorophylle a (*Chl a*), chlorophylle b (*Chl b*) et les caroténoïdes (C_{x+C}). Ces pigments sont situés dans les membranes des thylakoïdes des chloroplastes (Krayem *et al.*, 2021). La chlorophylle a et b possèdent l'atome de magnésium au centre, la *Chl b* diffère de la *Chl a* par la présence d'un groupe formyle (-CHO) à la place d'un groupe méthyle (-CH₃) sur l'anneau II (figure 1.5) (Pérez *et al.*, 2006). Les caroténoïdes sont des molécules tetraterpénoides que l'on trouve dans tous les organismes photosynthétiques et qui sont essentielles à leur survie (Pagels et Guedes, 2023). Ils sont divisés en deux groupes : les carotènes (comme les α et β carotènes) et les xanthophylles (dérivés oxygénés des carotènes) (Pagels *et al.*, 2021). Les chlorophylles ont deux bandes d'absorption principales : le bleu ou bleu-vert compris entre 450-475 nm et le rouge compris entre 630 nm et 675 nm. les caroténoïdes présentent une gamme d'absorption comprise entre 400 et 550 nm (figure 1.6) (Richmond, 2004).

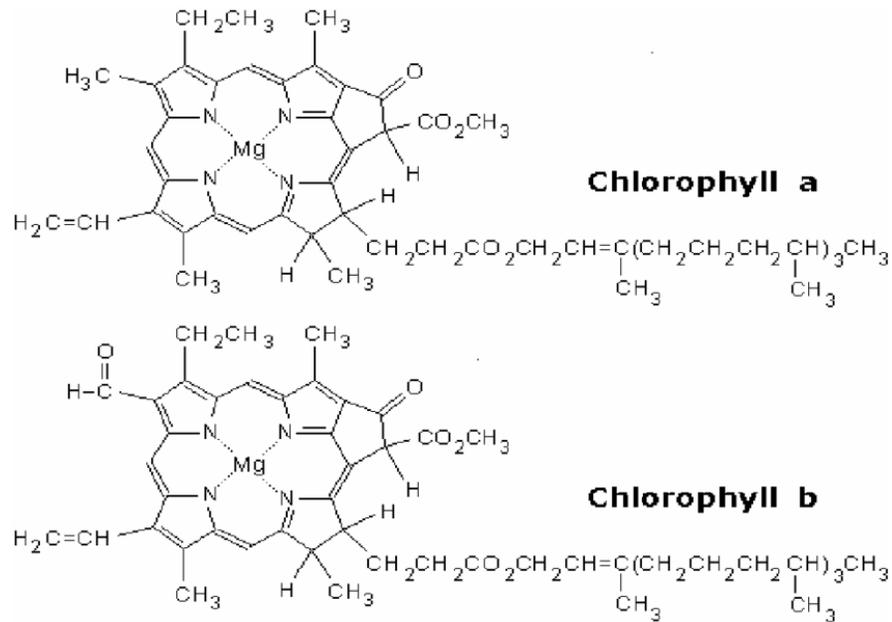


Figure 1.5 : Structure de la chlorophylle a et b (Pérez *et al.*, 2006)

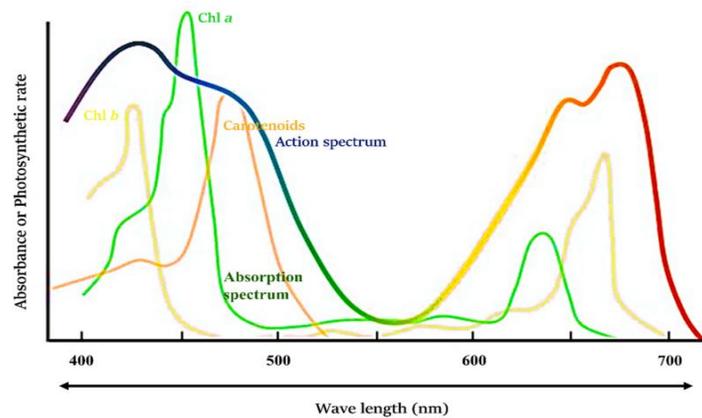


Figure 1.6 : Spectre d'absorption de pigments photosynthétiques (Janeesma *et al.*, 2022)

1.4.3 Photosystèmes

Chez les plantes supérieures et les algues, il existe deux sortes de photosystèmes. Le photosystème I (PSI) est l'oxydoréductase plastocyanine-ferrédoxine entraînée par la lumière située dans les membranes de thylakoïdes des cyanobactéries et des chloroplastes (Chitnis, 2001). Le

photosystème II (PSII) est le complexe protéique pigmentaire intégré dans la membrane de thylakoïdes des plantes supérieures, des algues et des cyanobactéries, qui utilise l'énergie solaire pour effectuer la réaction photosynthétique de séparation de l'eau (figure 1.7) (Hankamer *et al.*, 1997). Chaque photosystème est constitué d'un complexe central (qui contient le centre réactionnel), d'un complexe d'antenne de collecte de lumière (LHCI pour le PSI et LHCI) pour le PSII), composé de molécules de pigments, de caroténoïdes, de polypeptides, des ions ferriques, de plastoquinone (PQ), de polypeptides et de manganèse (figure 1.7) (Pessarakli, 2024; Whitmarsh et Govindjee, 2002).

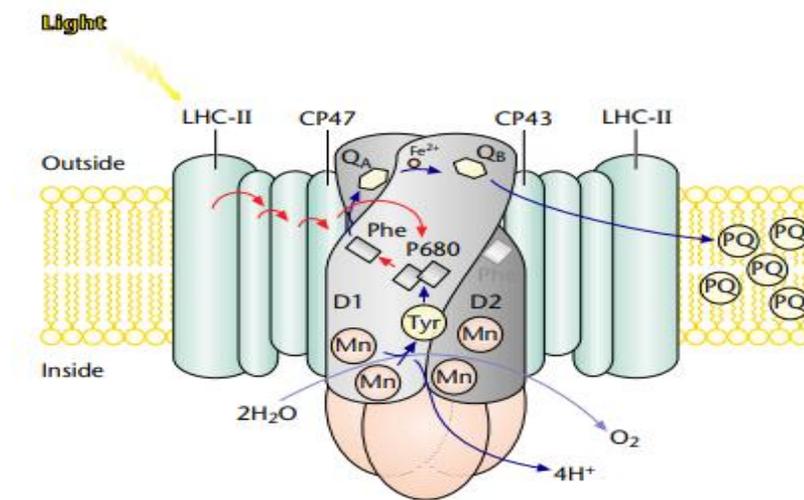


Figure 1.7 : Structure du photosystème II (Whitmarsh et Govindjee, 2002)

1.4.4 La cinétique rapide et polyphasique de la fluorescence de la *Chl a*.

La fluorescence de la *Chl a* émise par les plantes supérieures, les algues, les lichens et les bactéries photosynthétiques lors de l'illumination (fluorescence rapide) contient de nombreuses informations sur la structure et la fonction de l'appareil photosynthétique (Strasser *et al.*, 2010). Chez les plantes supérieures et les algues, la fluorescence émise à la température ambiante provient principalement des chlorophylles d'antennes du photosystème II (Strasser *et al.*, 2010). La fluorescence de la chlorophylle est induite en exposant la molécule à la lumière durant une seconde. La fluorescence montre une valeur constante indiquant F_0 (fluorescence minimale) après 20 μ s d'exposition à la lumière (Strasser *et al.*, 2010).

L'état de transition O est l'état où l'émission de la fluorescence est presque égale (figure 1.8), après cette phase l'émission de la fluorescence devient variable. Représentant l'état des transporteurs d'électrons dans le PSII (PQ, QA et QB). Les mesures de l'induction de fluorescence sont effectuées en utilisant des feuilles intactes adaptées à l'obscurité. Les plantes montrent une montée rapide polyphasique appelée O-J-I-P (Mathur, Sonal *et al.*, 2014), où le niveau O indique le niveau basal de la fluorescence (F_o), l'intensité de la fluorescence à 2 ms (F_j), et l'intensité de la fluorescence à 30 ms (F_i). Le niveau I reflète l'hétérogénéité du plastoquinone (PQ) lors du transfert de QA à QB, et P est la valeur maximale de fluorescence (FM) (figure 1.8). Certaines équations sont utilisées pour évaluer l'efficacité de la photosynthèse selon (Strasser *et al.*, 2010) :

ABS/RC permet d'évaluer l'absorption des antennes collectrices par le centre réactionnel actif du PSII :

$$\frac{ABS}{RC} = \frac{M_o}{V_j} = \Phi_{po}$$

D'où M_o est le taux initial d'induction de la fluorescence :

$$M_o = \frac{F_{300\mu s} - F_{20\mu s}}{(F_p - F_{20\mu s}) * 0,25}$$

$F_{300\mu s}$ est la fluorescence au niveau 300 μs

V_j représente la fluorescence variable relative à la réduction de QA :

$$V_j = \frac{F_{2ms} - F_{20\mu s}}{F_p - F_{20\mu s}}$$

F_{2ms} est le niveau de la fluorescence à 2ms (c'est le niveau de transition J)

Le rendement de la réaction photochimique initiale du PSII est calculé par la formule ci-dessous :

$$\Phi_{po} = \frac{F_p - F_{20\mu s}}{F_p} = \frac{F_v}{F_p}$$

$F_{20\mu s}$ est le niveau de fluorescence au niveau de transition O, F_p est la fluorescence maximale au niveau de transition P.

PI_{ABS} représente l'indicateur de la performance de l'activité photochimique du PSII, il est calculé par la formule ci-dessous :

$$PI_{ABS} = \left(\frac{1 - \frac{F_o}{F_m}}{\frac{M_o}{V_j}} \right) * \left(\frac{F_m - F_o}{F_o} \right) * \frac{1 - V_j}{V_j}$$

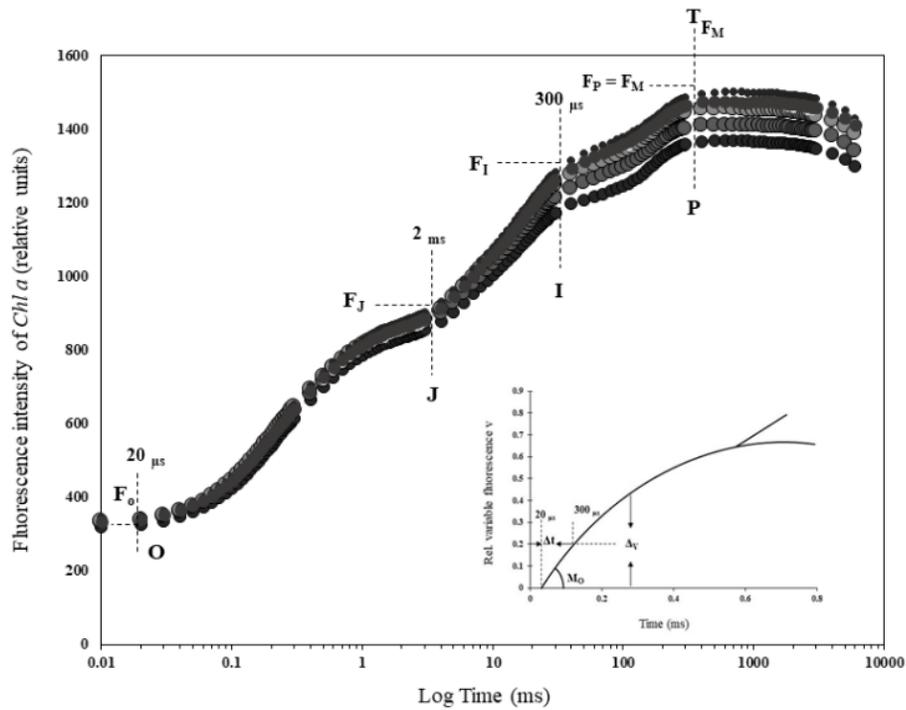


Figure 1.8 : Courbe de la fluorescence polyphasique de la *Chl a* (Strasser *et al.*, 2004; Tsimilli-Michael et Strasser, 2008). F_o est la valeur de la fluorescence à $20\mu s$ d'illumination. La phase O-J coïncide avec la réduction de QA (QA^-). La phase FI coïncide avec la première réduction de QB ($QA^- QB^-$). La phase I-P correspond à l'accumulation de QB réduit deux fois ($QA^- QB^{2-}$). La phase

FP coïncide avec la réduction maximale du PSII lorsque les PQs sont réduits en PQH₂. Par la suite, la fluorescence FP diminue et coïncide avec le transfert des électrons du PSI vers le PSII.

1.5 Les espèces réactives d'oxygènes

Les espèces réactives de l'oxygène (ERO) incluent des radicaux libres tels que les radicaux superoxyde (O₂⁻), les radicaux hydroxyles (OH), et des espèces non radicalaires comme H₂O₂ et l'oxygène singulet (O₂), sous diverses formes d'oxygène activé (Gülçin, I., Kireççi, Ekrem, Akkemik, Ebru, Topal, Fevzi et Hisar, 2010). Ces molécules sont des facteurs aggravants des lésions cellulaires et le processus de vieillissement (Gulcin *et al.*, 2002; Gülçin, İ. *et al.*, 2002; Halliwell et Gutteridge, 1985). Les ERO sont continuellement produites lors des événements physiologiques normaux et peuvent facilement initier la peroxydation des lipides membranaires, entraînant l'accumulation de peroxydes lipidiques (Gülçin, I., Kireççi, Ekrem, Akkemik, Ebru, Topal, Fevzi et Hisar, 2010). Cependant, elles sont éliminées par des mécanismes de défense antioxydants. Il existe un équilibre entre la production de ERO et leur inactivation par le système antioxydant des organismes (Gülçin, I., Kireççi, Ekrem, Akkemik, Ebru, Topal, Fevzi et Hisar, 2010). Le stress oxydatif survient lorsque la production de ROS dépasse les capacités de protection des défenses antioxydantes (Gülçin *et al.*, 2004; Oktay *et al.*, 2003). Dans les conditions pathologiques, les ERO sont surproduites, ce qui entraîne un stress oxydatif. Les ERO se forment lorsque les défenses antioxydantes endogées sont insuffisantes. Les déséquilibres entre les ERO et les mécanismes de défense antioxydants conduisent à des modifications oxydatives dans les membranes cellulaires ou sur les molécules intracellulaires (Büyükkuroğlu *et al.*, 2001; Gülçin, İ. *et al.*, 2006).

CHAPITRE 2

MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Préparation du matériel

Durant cette étude, tous les récipients utilisés pour les tests sont des fioles d'erenmeyer en verre de 50 ml. Toute la verrerie a été rincée avec de l'acide nitrique 10 % pour éliminer les ions de métaux lourds, puis rincée avec de l'eau contenant de l'alcool, enfin rincée avec de l'eau distillée. Tous les récipients utilisés pour les tests dans cette étude ont été autoclavés avant d'être utilisés pour les expériences.

2.2 Exigences préliminaires et incubation de la plante *Lemna minor*

La croissance de la plante *Lemna minor* a été réalisée avec le milieu de culture SIS, qui est une version modifiée du milieu de culture établi par l'Institut suédois de normalisation de la plante *Lemna minor*. Ce milieu contient les éléments suivants, selon les directives de l'OECD 2006-221 (OECD, 2006).

Tableau 2.1 : Composition du milieu SIS pour la culture de *Lemna minor*.

Solution mère	Substance	Concentration dans solution mère (g/L)	Concentration dans le milieu préparé (mg/L)	Volume de solution mère pour 1L milieu SIS (mL)
I	NaNO ₃	8,50	85	10
	KH ₂ PO ₄	1,34	13,4	
II	MgSO ₄ . 7H ₂ O	15	75	5
III	CaCl ₂ . 2H ₂ O	7,2	36	5
IV	Na ₂ CO ₃	4,0	20	5
V	H ₃ BO ₃	1,0	1,0	1
	MnCl ₂ . 4H ₂ O	0,20	0,20	
	Na ₂ MoO ₄ . 2H ₂ O	0,010	0,010	
	ZnSO ₄ . 7H ₂ O	0,050	0,050	
	CuSO ₄ . 5H ₂ O	0,0050	0,0050	
	Co (NO ₃) ₂ . 6H ₂ O	0,010	0,010	
VI	FeCl ₃ . 6H ₂ O	0,17	0,84	5
	Na ₂ -EDTA 2H ₂ O	0,28	1,4	

Les volumes de la solution mère pour la préparation du milieu SIS ont été ajoutés à 900 ml de l'eau nanopure. Le pH du milieu a été ajusté à 6,5 ±2 avec du HCl et du NaOH, puis le milieu a été autoclavé.

2.3 Préparation des solutions stock

2.3.1 Préparation de la solution Cr(VI)

La préparation de la solution du Cr(VI) a été effectuée avec la poudre de dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$). 100 mg ont été pesés et préparés dans un ballon jaugé de 1 L avec de l'eau nanopure. À partir de cette solution mère, une autre solution de $K_2Cr_2O_7$ à 10 mg/L a été préparée.

2.3.2 Préparation de la solution de la nano Al_2O_3

La poudre nano Al_2O_3 achetée chez Sigma Aldrich (numéro de lot 544833 50G), a été pesée à 1 g et dissoute dans 1 L d'eau nanopure. À partir de la solution mère de la nano Al_2O_3 , une autre solution à 100 mg/L a été préparée.

2.4 Préparation de la culture contaminée

Huit erlenmeyers de 50 ml ont été nettoyés comment décrit dans la section 2.1. Deux concentrations de Cr(VI) dont 5 et 10 mg/L, ont été préparées à partir des solutions mères de Cr(VI) dans le milieu de culture SIS, avec un volume final de 25 ml. De même, deux concentrations de la nano Al_2O_3 dont 10 et 100 mg/L, ont été préparées à partir des solutions mère de la nano Al_2O_3 dans le milieu de culture avec un volume final de 25 ml. Pour le test combiné (de Cr(VI) et de la nano Al_2O_3), chaque concentration de Cr(VI) a été combinée à chaque concentration de la nano Al_2O_3 , qui ont été préparées à partir de leurs solutions mères dans le milieu avec un volume de final de 25 ml. Trois plantes de la plante *Lemna minor* possédant trois frondes ont été ajoutées à chaque culture contaminée. Un contrôle a également été préparé contenant uniquement le milieu de culture et les plantes (sans le Cr(VI) et la nano Al_2O_3). Les plantes ont été cultivées sous la lumière, à une température ambiante (figure 2.1).



Figure 2.1 : Culture contaminée des plantes *Lemna minor*.

2.5 Expérience

2.5.1 Détermination de la croissance

Après une incubation de 7 jours de plantes *Lemna minor* dans le milieu de culture, le nombre de frondes (a) de chaque condition expérimentale a été compté, et le poids frais (b) a été mesuré.

- Calcul du taux croissance spécifique moyen

Le taux de croissance spécifique moyen est calculé par la formule ci-dessous :

$$\mu_{i-j} = (\ln(N_j) - \ln(N_i)) / (t)$$

Où :

μ_{i-j} est le taux de croissance spécifique moyen du temps i au temps j

N_i est la variable mesurée dans le récipient témoin ou traité au temps i

N_j est la variable mesurée dans le récipient témoin ou traité au temps j

t est la période de temps comprise entre i et j

- Le pourcentage d'inhibition du taux de croissance (%It)

$$(\%It) = \left(\frac{(\mu_c - \mu_T)}{\mu_c} \right) * 100$$

Où

%It est le pourcentage d'inhibition du taux de croissance spécifique moyen

μ_C est la valeur moyenne de μ dans le groupe témoin

μ_T est la valeur moyenne de μ dans le groupe traité

- Longueur des racines

La longueur de racine a été mesurée à l'aide du logiciel imageJ 1.54d, java 1.8.0_345 (64-bit). Aux jours 0 et 7, les photos des plantes ont été prises avec une règle placée à proximité des plantes. La mesure a été effectuée en établissant l'échelle à l'aide de la règle sur photo, ensuite la longueur de la racine de chaque plante a été mesurée en utilisant la fonction « Analyse » puis « Mesure » sur imageJ (figure 2.2).

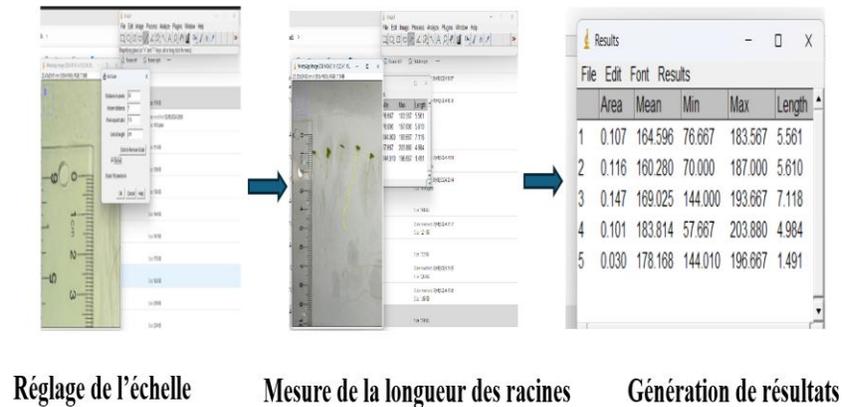


Figure 2.2 : Schéma de la mesure de la longueur de racines de plantes *Lemna minor* par le logiciel imageJ.

2.5.2 Détermination de la teneur de pigments photosynthétiques

Après une période d'incubation de sept jours, les plantes ont été cultivées dans différentes conditions. L'extraction des pigments s'est ensuite effectuée dans un endroit sombre et à température ambiante, en utilisant de l'éthanol à 95 % ou 100 %. Les échantillons ont ensuite été centrifugés à 5000 rpm (tours par minute) pendant 5 minutes. Les absorbances ont été mesurées à l'aide d'un lecteur microplaque, à différentes longueurs d'onde, dont 665 nm pour la *Chl a*, 649 nm pour *Chl b* et 470 nm pour les caroténoïdes (Mouzaki-Paxinou *et al.*, 2016) (figure 2.3). Les teneurs en différents pigments ont été calculées à l'aide des équations décrites ci-dessous par (Lichtenthaler, 1987).

$$Chl\ a = 13.36 \times (A_{665}) - 5.19 \times (A_{649})$$

$$Chl\ b = 27.43 \times (A_{649}) - 8.12 \times (A_{665})$$

$$Cx+c = (1000 \times (A_{470}) - (2.13 \times Chl\ a) - (97.64 \times Chl\ b)) / 209$$

Où : *Chl a*, *Chl b*, et *Cx+c* sont les teneurs en chlorophylle a, chlorophylle b et en caroténoïde respectivement en ($\mu\text{g/mL}$) et A_{665} , A_{649} , A_{470} représentent l'absorbance à 665, 649, 470 nm respectivement. La teneur en chlorophylle a été normalisée par mg du poids frais de la plante *Lemna minor*.

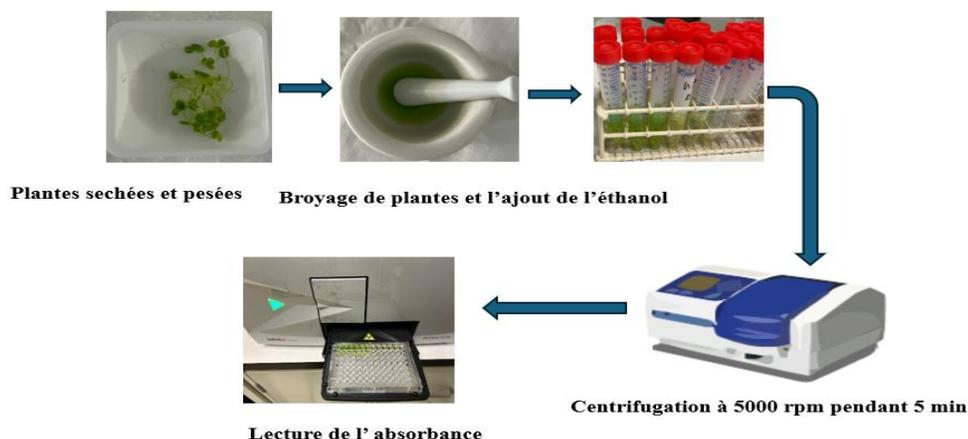


Figure 2.3 : Schéma de la détermination de la teneur de pigments photosynthétiques.

2.5.3 Mesure de la cinétique de fluorescence de la *Chl a*

La cinétique rapide de la fluorescence de la *Chl a* a été mesurée en utilisant le HANDY-PEA (HANSATECH®). Après sept jours d'incubation, les plantes ont été laissées dans l'obscurité pendant 15-30 minutes pour entraîner la décharge (oxydation) de la chaîne de transport d'électrons. Ensuite, les plantes ont été exposées à une stimulation par flash lumineux d'une seconde.

2.5.4 Détermination des ERO (espèces réactives d'oxygène)

La production de ERO ou ROS (reactive oxygen species en anglais) a été effectuée en utilisant le réactif CellROX. Le nom de la molécule du réactif CellROX n'est pas fourni par le fabricant. La molécule est intrinsèquement non fluorescente, et émet une fluorescence en présence de ROS. C'est en fonction de la fluorescence émise, que nous avons déterminé le niveau de ROS dans les différentes plantes incubées avec différentes concentrations de la nano Al_2O_3 et du Cr(VI). Après sept jours d'incubation des plantes dans le milieu de culture contenant la nano Al_2O_3 et le Cr(VI), les plantes ont été séchées, placées dans une microplaque, puis, le réactif CellROX à $5\mu M$ a été ajouté. Les plantes ont été incubées pendant 30 minutes sous la lumière. Ensuite, elles ont été lavées avec le tampon PBS (phosphate saline), et la lecture de la fluorescence a été faite à l'aide du lecteur microplaque (Tecan infinite M200), avec une longueur d'excitation à 485 nm et d'émission à 520 nm.

2.6 Caractérisation de la nano Al₂O₃

2.6.1 Structure cristallographique

La structure cristallographique de la nano Al₂O₃ a été effectuée en utilisant la diffraction des rayons X (DRX) (modèle Bruker, D8 Advance). La poudre nano Al₂O₃ a été analysée par la diffraction des rayons X.

2.6.2 Groupements fonctionnels

Les groupements fonctionnels présents sur la surface de la nano Al₂O₃ ont été déterminés par la spectroscopie d'infrarouge à transformée de fourrier (FTIR). La poudre nano Al₂O₃ a été directement analysée par le FTIR. Les nano dans le milieu de culture contenant les plantes après 7 jours d'exposition, seules, et en interactions avec le Cr(VI) ont été également analysées par le FTIR, en utilisant le milieu SIS contrôle (milieu de culture incubé avec les plantes sans la nano Al₂O₃ et le Cr(VI) comme arrière-plan (background)).

2.6.3 Taille hydrodynamique et le potentiel Zêta

La taille hydrodynamique dans la solution a été mesurée par le principe de la diffraction dynamique de la lumière (DLS). La taille hydrodynamique et le potentiel zêta ont été mesurés avec l'analyseur de taille Malvern, zeatasiter Ultra (Red Labe). Les nano Al₂O₃ dans l'eau nanopure, ainsi que dans le milieu SIS de culture sans et en interaction avec le Cr(VI) ont été analysées au jour 0 et au jour 4.

2.7 Analyse statistique

Les moyennes et les écarts-types ont été calculés pour chaque traitement. L'analyse statistique a été effectuée à l'aide du logiciel orginPro 2024b, version 10.1.5.132 (Learning Edition). Les différences significatives entre les groupes traités et les groupes témoins ont été évaluées à l'aide d'une analyse de variance unidirectionnelle (ANOVA) suivie des tests de comparaisons multiples de Tukey. Les différences étaient considérées comme statistiquement indicatives pour $p < 0,05$.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Durant ce travail, nous avons évalué l'effet de la nano Al_2O_3 sur la toxicité du (Cr(VI)) en utilisant l'espèce biologique *Lemna minor* comme bioindicateur. Nous avons déterminé les caractéristiques physico-chimiques de la nano Al_2O_3 . Ensuite, nous avons évalué son influence sur la toxicité du Cr(VI) en observant les propriétés physiologiques de la plante telles que les nombres de frondes, le poids frais, la longueur de racines, la teneur en pigments photosynthétiques, l'efficacité de la photosynthèse, et la production de ROS.

3.1 Caractérisation physico-chimie de la nano Al_2O_3

3.1.1 Structure cristallographique de la nano Al_2O_3

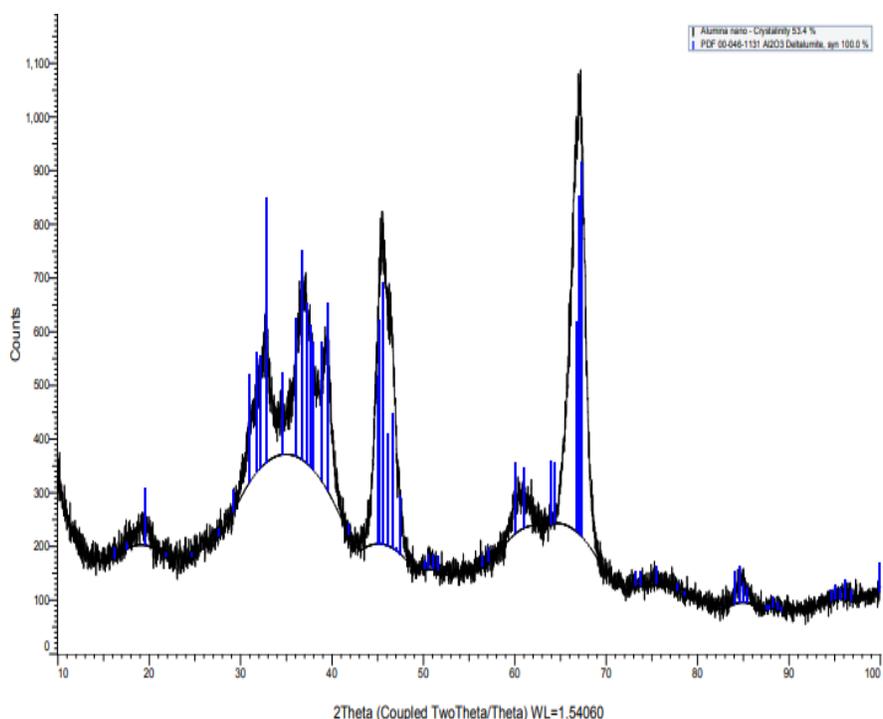


Figure 3.1 : Le spectre XRD de la nano Al_2O_3 représentant la structure cristallographique de la nano Al_2O_3 . Les pics en noir représentent la poudre de la nano Al_2O_3 utilisées pour la caractérisation

et les pics en bleu représentent la molécule qui correspondait mieux à la nano Al_2O_3 dans la base de données.

L'analyse par diffraction des rayons X (XRD) a permis de déterminer la structure cristallographique du nano Al_2O_3 . Le spectre obtenu (figure 3.1) a révélé différents pics à divers angles, qui sont très fins, ce qui confirme la petite taille des cristallins. Le pourcentage de cristallinité calculé à partir du XRD est de 53,4 %. La molécule correspondante le mieux à la poudre nano Al_2O_3 dans la base de données était le deltalumite, ce qui indique que la nano Al_2O_3 caractérisée est sous la phase delta.

3.1.2 Groupements fonctionnels de la nano Al_2O_3

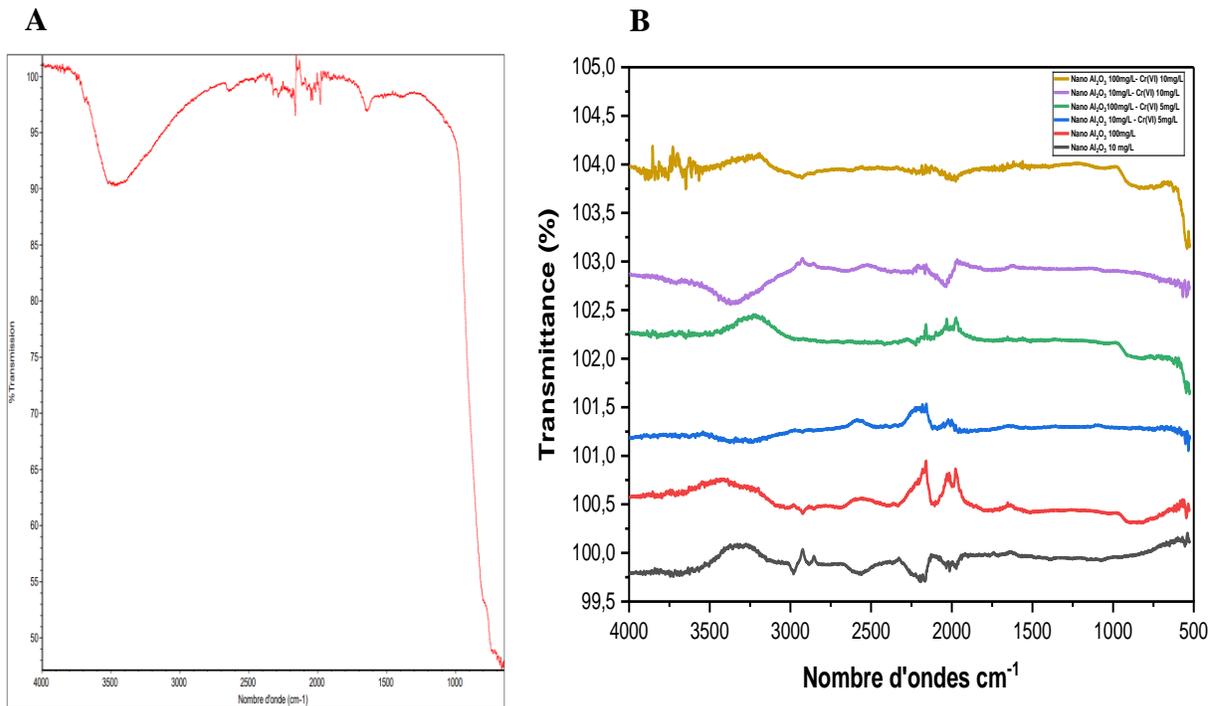


Figure 3.2 : Le spectre de FTIR de la poudre de nano Al_2O_3 (A) et de l'interaction entre la nano Al_2O_3 et le Cr(VI) dans le milieu de culture (B). Les couleurs noire, rouge, bleue, verte, violette, marron sur le spectre représentent la nano Al_2O_3 10 mg/L, la nano Al_2O_3 100 mg/L, la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 100 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L, et la nano Al_2O_3 100 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L respectivement.

La FTIR a permis de déterminer les groupements fonctionnels présents sur la surface de la poudre nano Al_2O_3 . Les résultats ont révélé des bandes d'absorption à 3475,05 et 1643,01 cm^{-1} , correspondant respectivement à la présence de groupements hydroxyle et carboxyle (figure 3.2A).

L'interaction entre la nano Al_2O_3 et le Cr (VI) dans le milieu de culture SIS a également évaluée, en se basant sur les groupements fonctionnels. Nous avons observé que les groupements fonctionnels de la nano Al_2O_3 à 10 et 100 mg/L dans le milieu de culture étaient presque identiques, avec la présence du groupement hydroxyle entre 3500 et 3000 cm^{-1} (figure 3.2 B) bien qu'avec la nano à 100 mg/L, on remarque une perte de groupement hydroxyle entre 3500 et 3000 cm^{-1} (figure 3.2 B). L'interaction de la nano Al_2O_3 à 10 mg/L et le Cr (VI) à 5 mg/L dans le milieu de culture SIS a conduit à la perte du groupement hydroxyle entre 3500 et 3000 cm^{-1} (figure 3.2 B). On peut également remarquer la perte de formation du groupement hydroxyle entre 3500 et 3000 cm^{-1} ainsi que de certains autres pics sur le spectre avec la nano Al_2O_3 à 100 mg/L et de Cr(VI) à 10 mg/L. (Figure 3.2 B). Le spectre FTIR présente certains pics avec une augmentation de la transmittance, alors que d'autres pics, dans les mêmes conditions, ont une diminution de la transmittance (figure 3.2B).

3.1.3 Taille hydrodynamique et le potentiel zêta

Tableau 3.1 : Changements de la taille hydrodynamique et de potentiels zêta de la nano Al₂O₃ caractérisée dans l'eau nanopure (A) et dans le milieu de culture (B). ** représente (p<0,01) comparé au jour 0. (n=3) pour le tableau A et (n=4) pour le tableau B.

A

Nano dans eau nanopure	Taille hydrodynamique (nm)	Potentiel zêta (mV)
Nano Al₂O₃ 40mg/L	949,7 (494,253)	24,79 (20,132)

B

Conditions	Taille hydrodynamique (nm) jour 0	Potentiel zêta (mV) jour 0	Taille hydrodynamique (nm) jour 4	Potentiel zêta (mV) jour 4
NanoAl₂O₃ 10mg/L	971,275 (105,421)	-6,48525 (2,122)	1564,25 (448,799)	-13,6975** (3,094)
NanoAl₂O₃ 100mg/L	2310,75 (633,715)	-2,66 (0,695)	3225,75 (661,236)	-12,428** (1,003)
NanoAl₂O₃10mg/L+ Cr(VI) 5mg/L	1774,5 (1067,312)	-0,666 (0,29)	1510,75 (140,003)	-20,675** (3,224)
NanoAl₂O₃100mg/L+ Cr (VI) 5mg/L	3327,5 (1361,633)	4,532 (3,47)	3346,775(1983,836)	-7,870** (3,241)
NanoAl₂O₃10mg/L+ Cr (VI) 10mg/L	1823,5 (753,237)	-3,41735 (3,235)	1697,25 (279,477)	-17,743** (0,868)
NanoAl₂O₃10mg/L+ Cr (VI) 100mg/L	2328,5 (562,789)	-0,32766 (0,318)	3958,75** (523,714)	-11,389** (1,964)

Les valeurs dans () représentent l'écart type.

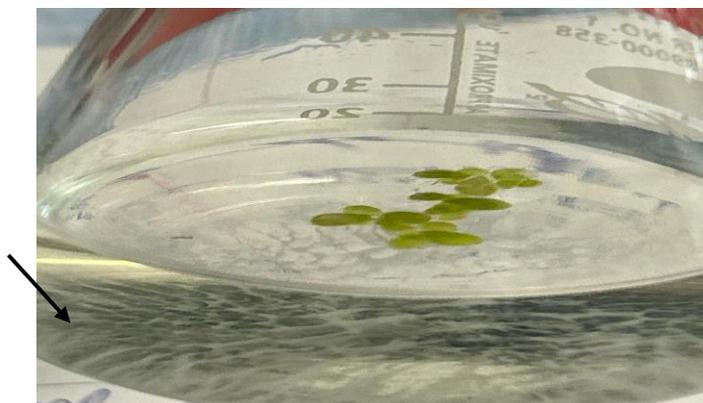


Figure 3.3 : Sédimentation de la nano Al_2O_3 à 100 mg/L dans le milieu de culture SIS. La flèche indique la sédimentation de la nano Al_2O_3 .

Durant ce travail, la taille hydrodynamique en suspension a été évaluée, par le principe de la diffraction dynamique de la lumière (DLS) et nous avons également mesuré le potentiel zêta. Les résultats ont montré que la nano Al_2O_3 forme des agglomérations dans l'eau nanopure (tableau 3.1 A) ainsi que dans le milieu de culture au temps 0 (tableau 3.1). Une altération de la taille hydrodynamique après 4 jours d'incubation dans le milieu de culture a été observée. Une augmentation de la taille de 61,1 % de la nano Al_2O_3 à 10 mg/L a été constatée au jour 4, comparée à la nano Al_2O_3 à 10 mg/L au jour 0. À cette même concentration de la nano, le potentiel zêta est devenu plus négatif (passant de -6,485 mV à -13,697 mV) (tableau 3,1 B) en comparant le jour 0 au jour 4. Une augmentation de 39,6 % de la taille des particules avec la nano 100 mg/L a été observée au jour 4, comparée à la même concentration au jour 0, ainsi qu'un changement important du potentiel zêta, passant de -2,66 mV au jour 0 à -12,427 mV au jour 4. Nous avons également observé que l'interaction de la nano Al_2O_3 avec Cr(VI) a conduit à l'augmentation de la taille hydrodynamique dès le jour 0. Au jour 4, une diminution de 14,9 % de la taille hydrodynamique a été observée avec la nano Al_2O_3 10 mg/L - Cr(VI) 5 mg/L, par rapport au jour 0. Une diminution de 6,9 % a été observée avec la nano Al_2O_3 10 mg/L - Cr(VI) 10 mg/L, par rapport à la taille au jour 0. Nous avons constaté que l'interaction de la nano Al_2O_3 100 mg/L – Cr (VI) 5 mg/L dans le milieu de culture n'a presque pas entraîné un changement significatif de la taille hydrodynamique au jour 4 par rapport au jour 0 (tableau 3.1B). En revanche, l'interaction de la nano Al_2O_3 100 mg/L avec le Cr(VI) 10 mg/L au jour 4 a augmenté significativement ($p < 0,01$) la taille hydrodynamique

de 70 % par rapport au jour 0 (tableau 3.1B). L'interaction entre la nano Al_2O_3 et le Cr (VI) dans le milieu de culture, dans toutes les conditions expérimentales, a conduit à une diminution du potentiel zêta, celui-ci devenant négatif ou plus négatif au jour 4 par comparaison au jour 0 (tableau 3.1B). Nous avons également observé une sédimentation de la nano Al_2O_3 dans le milieu de culture dans toutes les conditions expérimentales contenant la nano Al_2O_3 à 100 mg/L (figure 3.3).

3.2 Évaluation sur la physiologie de la plante *Lemna minor*

3.2.1 Effet du Cr(VI) et de la nano Al_2O_3 sur le phénotype de *Lemna minor*

- Nombre de frondes et le Poids frais

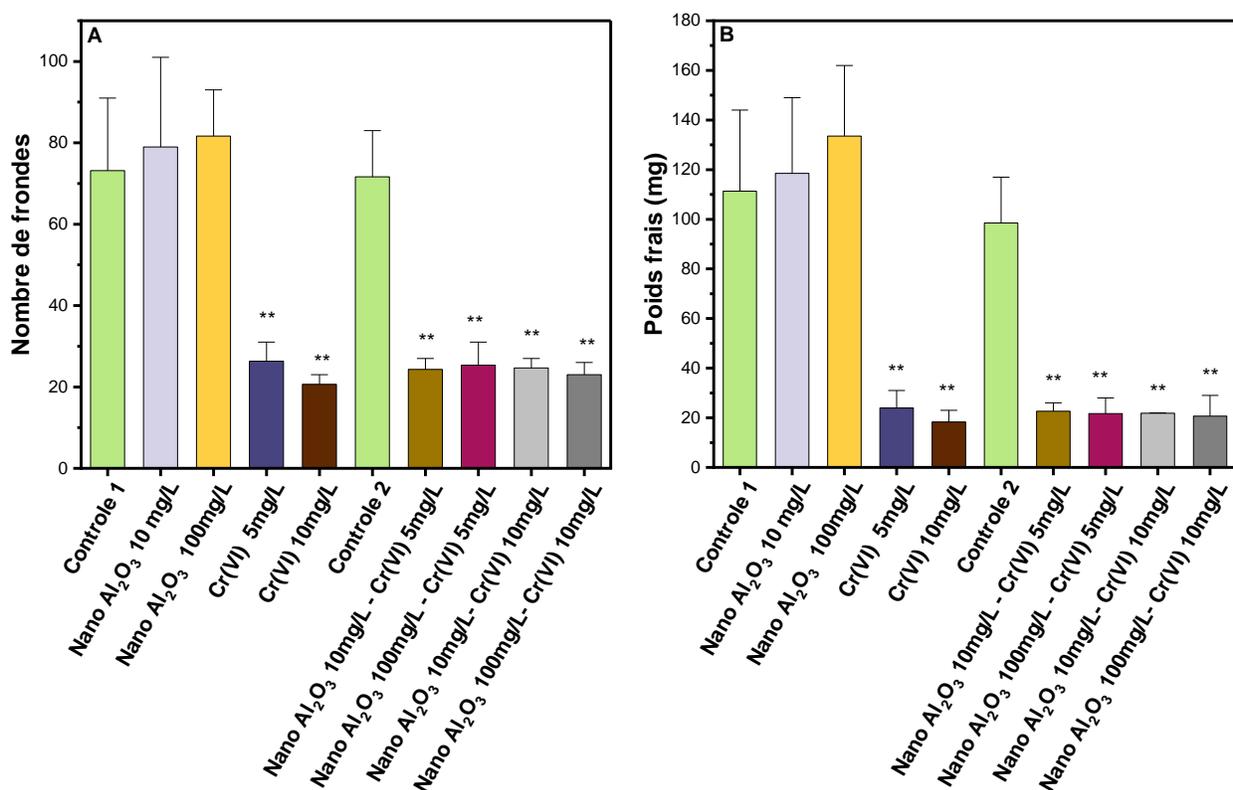


Figure 3.4 : Changements dans le nombre de frondes (A) et le poids frais (B) de la plante *Lemna minor* exposée à différentes concentrations du Cr(VI) et de la nano Al_2O_3 (les deux contaminants

combinés et non combinés) après 7 jours d'incubations. ** ($p < 0,01$) comparée au contrôle (contrôle 1 et 2 représentent les contrôles de test combiné et non combiné respectivement) ($n=6$).

Afin d'évaluer la croissance, le nombre de frondes a été compté et le poids des plantes a été pesé après 7 jours d'incubation dans le milieu de culture. Le résultat indique que la nano Al_2O_3 augmente le nombre de frondes ainsi que le poids frais de la plante *Lemna minor* par rapport au contrôle, mais pas de façon significative (figure 3.4 A et B), une augmentation de nombre de frondes de 8 % a été observée avec la nano Al_2O_3 à 10 mg/L et 11,6 % avec la nano Al_2O_3 à 100 mg/L par rapport au contrôle (figure 3.4 A). Une augmentation du poids frais de 6,4 % a été également observée avec la nano Al_2O_3 à 10 mg/L et 20 % avec la nano Al_2O_3 à 100 mg/L par rapport au contrôle (figure 3.4 B). Une diminution significative ($p < 0,01$) dans le nombre de frondes et dans le poids frais de plantes traitées avec le Cr (VI) comparé au contrôle a été observée (figure 3,4 A et B). Il y a eu une diminution de 64,5 % et 71,8 % du nombre de frondes avec le Cr (VI) à 5 mg/L et le Cr (VI) à 10 mg/L, respectivement (figure 3,4 A). Le poids frais de plantes a diminué de 78,4 % et 83,5 % avec le Cr (VI) à 5 mg/L et le Cr (VI) à 10 mg/L, respectivement (figure 3.4 B).

Bien que la nano Al_2O_3 ait légèrement augmenté le nombre de frondes ainsi que le poids frais de plante *Lemna minor* par rapport au contrôle, elle n'a pas eu de l'impact sur la toxicité du Cr (VI). Une diminution significative ($p < 0,01$) dans nombre de frondes ainsi que dans le poids frais de la plante a été observée avec le Cr(VI) combiné à la nano Al_2O_3 dans toutes les conditions expérimentales (figure 3.4 A et B). La plus grande inhibition du nombre de frondes a été observée avec le traitement combiné de la nano Al_2O_3 à 100 mg/L et du Cr(VI) à 10 mg/L qui a diminué le nombre de frondes de 67,9 % comparé au contrôle (figure 3.4 A), suivi de 66 %, 65,6 %, 64,7 % avec la nano Al_2O_3 10 mg/L- Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 10 mg/L- Cr(VI) 10 mg/L, et la nano Al_2O_3 100 mg/L -Cr(VI) 5 mg/L, respectivement (figure 3.4 A). La plus grande inhibition du poids frais a été également observée avec le traitement combiné de la nano Al_2O_3 à 100 mg/L et du Cr(VI) à 10 mg/L avec une inhibition de 79 % par rapport au contrôle (figure 3.4 B), suivi de 78 %, 77,8 % et 77 % avec la nano Al_2O_3 100 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L, et la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, respectivement.

- La longueur de racines

Tableau 3.2 : Changement dans la longueur des racines des plantes *Lemna minor* traitées avec la nano Al₂O₃ et le Cr(VI) au jour zéro (jour 0) et au septième jour (jour 7) après l'incubation de plantes (n=4).

Conditions expérimentales	Jour 0 (cm)	Jour 7 (cm)
Contrôle	2,706 (1,519)	2,669 (1,000)
NanoAl₂O₃ 10 mg/L	3,178 (1,553)	3,003 (1,779)
Nano Al₂O₃ 100mg/L	3,031(1,737)	3,290(1,792)
Cr(VI) 5mg/L	3,210 (0,820)	NA
Cr(VI) 10mg/L	3,143 (1,669)	NA
Nano Al₂O₃ 10mg/L Cr(VI)+ 5mg/L	2,653 (1,593)	NA
Nano Al₂O₃ 100mg/L + Cr(VI) 5mg/L	2,975 (1,684)	NA
Nano Al₂O₃ 10mg/L+ Cr(VI) 10mg/L	3,278 (1,323)	NA
Nano Al₂O₃ 100mg/L+ Cr(VI) 10mg/L	3,029 (1,496)	NA

Les valeurs dans () représentent l'écart-type. NA égale non applicable

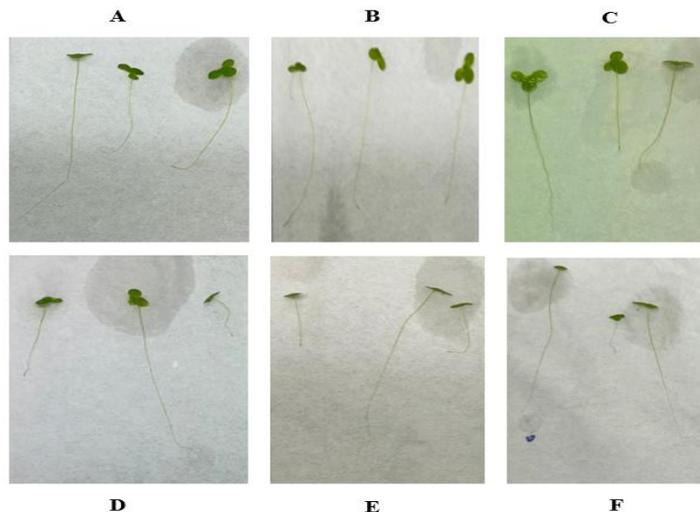


Figure 3.5 : Longueur des racines des plantes *Lemna minor* traitées avec le Cr(VI) au jour zéro (jour 0) avant l'incubation. A, B, C, D, E, F représentent respectivement Cr(VI) 5 mg/L, Cr(VI) 10 mg/L, nano Al₂O₃ 10 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, nano Al₂O₃ 100 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, nano Al₂O₃ 10 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L, et nano Al₂O₃ 100 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L, (n=4).

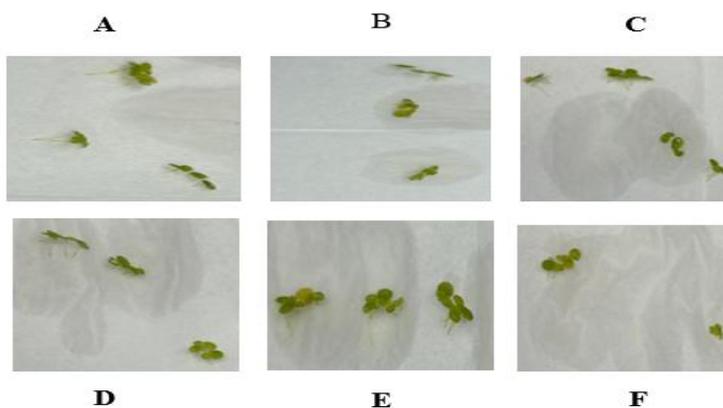


Figure 3.6 : Perte des racines des plantes *Lemna minor* traitées avec le Cr(VI) après sept jours d'incubation dans le milieu de culture. A, B, C, D, E, F représentent Cr(VI) 5 mg/L, Cr(VI) 10 mg/L, nano Al₂O₃ 10 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, nano Al₂O₃ 100 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, nano Al₂O₃ 10 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L, et nano Al₂O₃ 100 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L respectivement, (n=4).

Le résultat a montré que la longueur de racines n'a presque pas changé du jour 7 comparé au jour 0 (tableau 3.2). Une légère augmentation de la longueur des racines de 8,5 % a été observée avec la nano Al₂O₃ 100 mg/L au jour 7 par rapport au jour 0 (tableau 3.2). En revanche, une perte de racines a été constatée dans tous les tests contenant du Cr (VI) à 5 mg/L et à 10 mg/L, quelle que

soit la condition expérimentale au jour 7 (figure 3.6 A-F) par rapport, au jour 0 (figure 3.5 A-F). Nous avons également observé, dans tous les tests contenant le Cr(VI) (test combiné et non combiné), des effets chlorose sur les feuilles (figure 3.6 A-F).

3.2.2 Effet du Cr(VI) et de la nano Al₂O₃ sur le pourcentage de taux d'inhibition de croissance

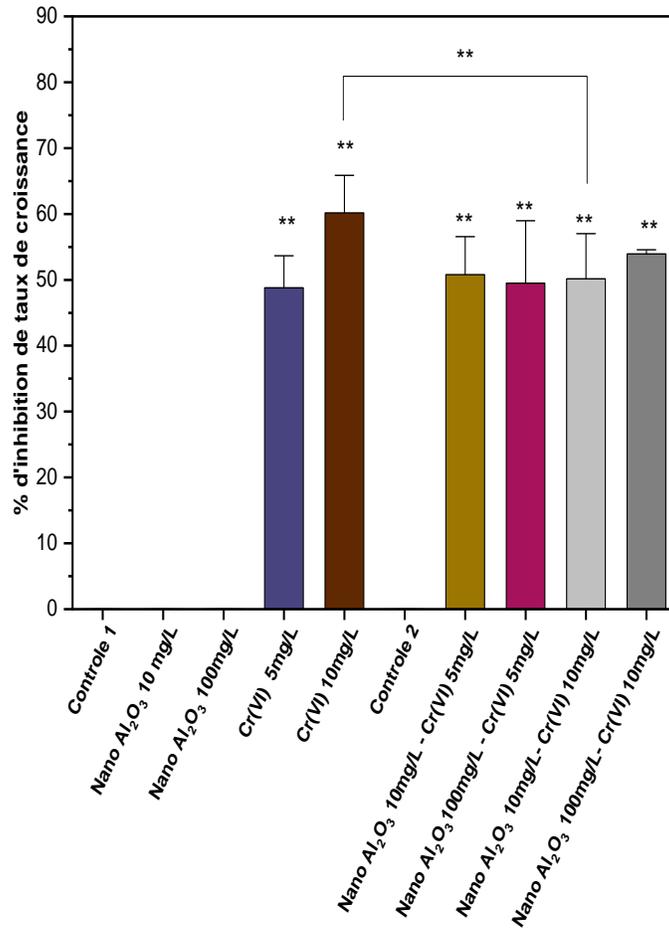


Figure 3.7: Effet de l'inhibition de la croissance causé par Cr(VI) et la nano Al₂O₃ (combiné et non combiné) sur la croissance de la plante *Lemna minor*. Le pourcentage de taux d'inhibition de la croissance (%) a été calculé en utilisant de nombre de frondes exposées aux différentes concentrations du Cr(VI) et la nano Al₂O₃ (combiné et non combiné) après 7 jours d'incubation. ** (p<0,01) comparé au contrôle (contrôle 1 et 2 représentent le contrôle de test combiné et non combiné respectivement) (n=6).

Dans ce travail, l'inhibition de la croissance des plantes traitées avec le Cr(VI) et la nano Al₂O₃ (combinés et non combinés) a été évalué. Le contrôle correspond à une croissance idéale, donc 0 %

d'inhibition de la croissance (figure 3.7). La nano Al_2O_3 présente également 0 % de l'inhibition de taux de croissance. En revanche, nous avons constaté une diminution de la croissance avec les deux concentrations de Cr(VI), 5 et 10 mg/L, avec des taux d'inhibition de 48,8 % et 60,2 %, respectivement. Nous avons observé que la présence de la nano à 10 mg/L a significativement diminué ($p < 0,01$) de pourcentage de l'inhibition de taux de croissance de plantes traitées avec le Cr(VI) à 10 mg/L passant de 60,2 % à 50,2 % (figure 3.7).

3.3 Effet du Cr(VI) et de la nano Al_2O_3 sur la teneur en pigments photosynthétiques

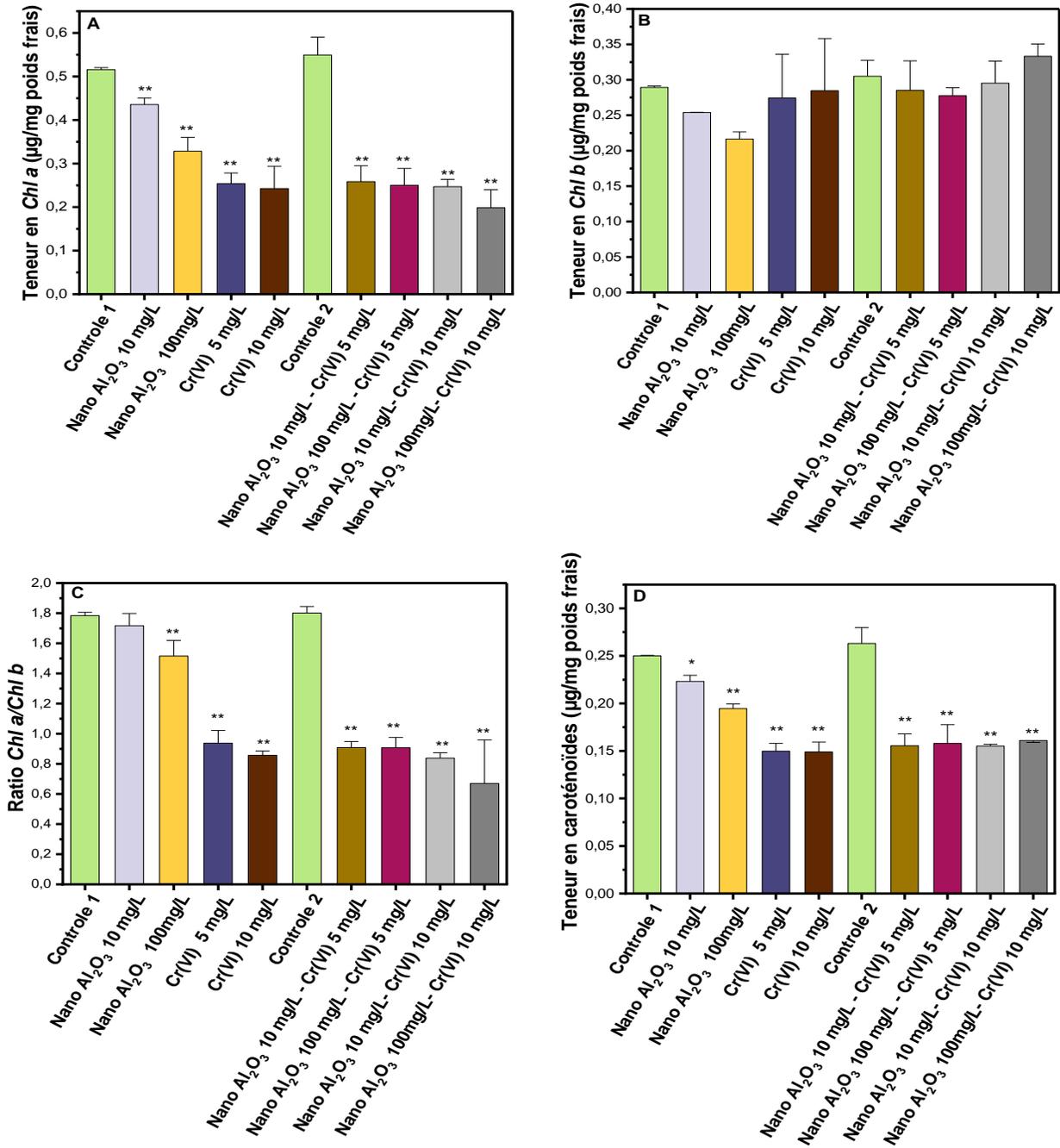


Figure 3.8 : Changement dans la teneur de la *Chl a* (A), *Chl b* (B), ratio *Chl a/Chl b* (C) et les caroténoïdes (D) des plantes traitées avec le Cr(VI) et la nano Al₂O₃ après 7 jours d'incubation. **

($p < 0,01$) comparé au contrôle (contrôle 1 et 2 représentent le contrôle de test combiné et non combiné, respectivement), ($n=5$).

Nous avons également évalué la teneur de pigments photosynthétiques tels que la *Chl a*, *Chl b* et les caroténoïdes. Les résultats ont montré que le Cr(VI) à 5 mg/L et 10 mg/L inhibent significativement ($p < 0,01$) la teneur en *Chl a* de 57,8 et % 53 % respectivement, par rapport au contrôle (figure 3.8A). Nous avons également constaté que la nano Al_2O_3 diminue significativement ($p < 0,01$) la teneur en *Chl a* par rapport au contrôle (figure 3.8A), avec une réduction de 15 % pour la nano Al_2O_3 à 10 mg/L et de 36,3 % pour la nano Al_2O_3 à 100 mg/L. La nano Al_2O_3 a augmenté (de manière non significative) la toxicité du Cr(VI) de 18,3 % avec la nano Al_2O_3 à 100 mg/L- Cr (VI) 10 mg/L par rapport au Cr(VI) seul à 10 mg/L.

Une légère augmentation de la *Chl b* a été observée avec le Cr(VI) à 5 et 10 mg/L par rapport au contrôle, tandis qu'une diminution de 12,1 % et 25,2 % de la *Chl b*, par rapport au contrôle, a été constatée avec la nano Al_2O_3 à 10 et 100 mg/L, respectivement (figure 3.8 B). Nous avons constaté une augmentation de la quantité de la *Chl b* de 17,0 % avec la nano Al_2O_3 100 mg/L-Cr 10 par comparaison au Cr(VI) seul à 10 mg/L (figure 3.8 B). Le ratio *Chl a/Chl b* a également été affecté par le Cr(VI) et la nano Al_2O_3 . Une diminution significative ($p < 0,01$) du ratio *Chl a/Chl b* de 47,4 % et 52 % a été observée avec le Cr(VI) à 5 et 10 mg/L, respectivement (figure 3.8 C). De même, la nano Al_2O_3 à 100 mg/L a montré une diminution significative ($p < 0,01$) du ratio *Chl a/Chl b* de 15 %. L'interaction du Cr(VI) et la nano Al_2O_3 a diminué le ratio *Chl a/Chl b* de 49,6 %, 49,6 %, 53,5 % et 62,8 % avec la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 100 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L, et la nano Al_2O_3 100 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L, respectivement (figure 3.8 C). Nous remarquons que la toxicité du Cr(VI) a augmenté de 21,9 % avec la nano Al_2O_3 100 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L par rapport au Cr(VI) seul à 10 mg/L.

Le Cr (VI) a significativement ($p < 0,01$) diminué la teneur en caroténoïdes de 40,1 % et 40,4 % avec le Cr(VI) à 5 et 10 mg/L, respectivement, comparé au contrôle. Une diminution significative ($p < 0,05$ et $p < 0,01$) de 10,7 % et 22,2 % a été observée avec nano Al_2O_3 à 10 et 100 mg/L respectivement. Une diminution significative de 40,8 %, 40,0 %, 41,1 %, 38,8 % a été observée avec la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 100 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L, et la nano Al_2O_3 100 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L, respectivement.

3.4 Effet du Cr(VI) et de la nano Al₂O₃ sur l'efficacité de la photosynthèse

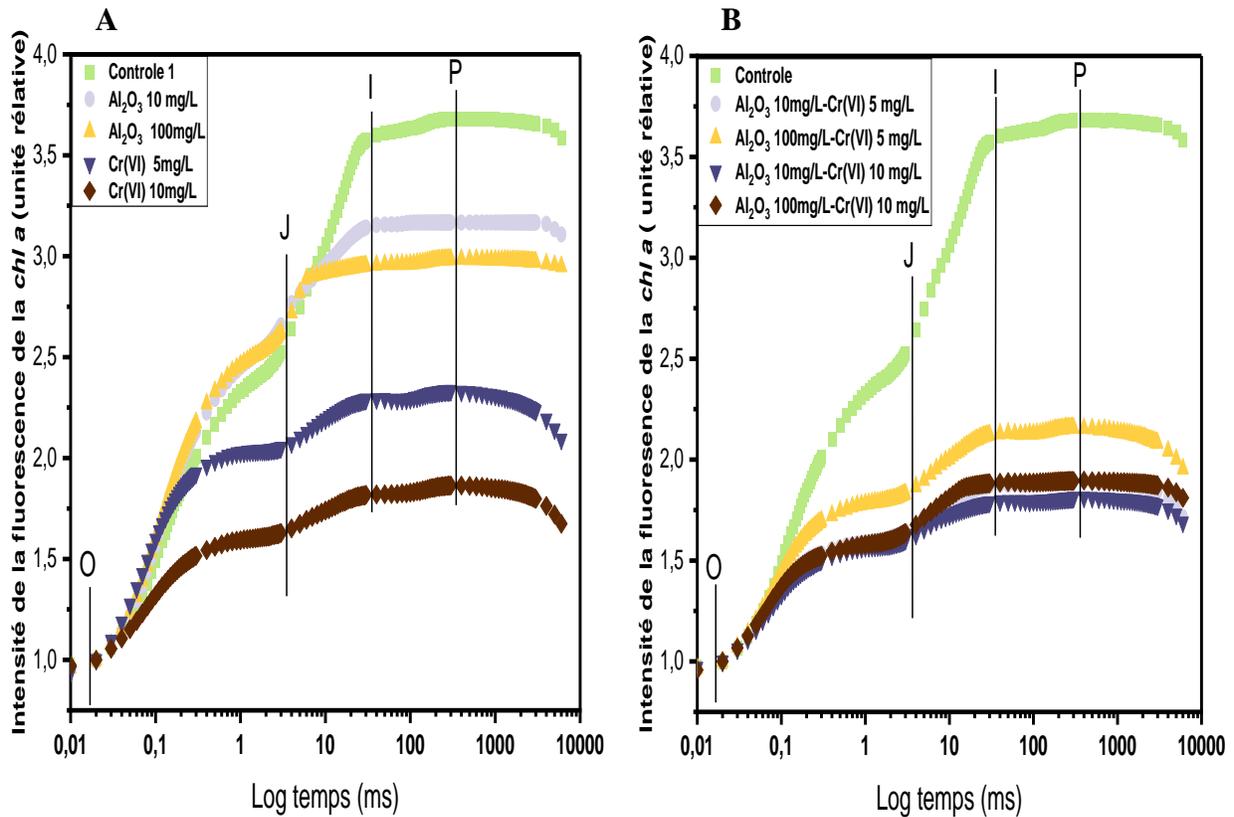


Figure 3.9 : Changement de la montée rapide et polyphasique de la cinétique de fluorescence de la *Chl a* de plantes *Lemna minor* causé par le Cr(VI) et la nano Al₂O₃. (A) représente le test contenant le Cr(VI) et la nano Al₂O₃ non combiné et (B) représente le test contenant le Cr(VI) et nano Al₂O₃ combiné, (n=4).

Tableau 3.3 : Changement dans les différents paramètres photosynthétiques de plantes *Lemna minor* causé par le Cr(VI) et la nano Al₂O₃. (A) représente le test contenant le Cr(VI) et la nano Al₂O₃ non combiné et (B) représente le test contenant le Cr(VI) et nano Al₂O₃ combiné, (n=4).

A					
Paramètres	Contrôle	NanoAl₂O₃ 10 mg/L	NanoAl₂O₃ 100mg/L	Cr(VI) 5 mg/L	Cr(VI) 10 mg/L
FV/Fm	0,729 (0,009)	0,684 (0,045)	0,665 (0,007)	0,572** (0,009)	0,463** (0,083)
ABS/RC	2,111 (0,117)	2,248** (0,104)	2,388** (0,101)	2,986** (0,103)	2,903** (0,127)
V_j	0,533 (0,027)	0,726* (0,180)	0,777** (0,035)	0,774** (0,049)	0,706 (0,058)
PI_{ABS}	0,609 (0,081)	0,265** (0,254)	0,125** (0,027)	0,063** (0,017)	0,058** (0,036)
Fo/Fm	0,271 (0,009)	0,316 (0,045)	0,335 (0,007)	0,428** (0,009)	0,537** (0,083)

B					
Paramètres	Contrôle	NanoAl₂O₃ 10mg/L+ Cr(VI) 5mg/L	NanoAl₂O₃ 100mg/L+ Cr(VI) 5mg/L	NanoAl₂O₃ 10mg/L+ Cr(VI) 10mg/L	NanoAl₂O₃ 100mg/L+ Cr(VI) 10mg/L
FV/Fm	0,729 (0,009)	0,471** (0,047)	0,534** (0,032)	0,449** (0,052)	0,466** (0,055)
ABS/RC	2,111 (0,117)	3,021** (0,020)	2,934** (0,066)	3,023** (0,076)	3,000** (0,092)
V_j	0,533 (0,027)	0,686 (0,053)	0,694 (0,055)	0,714 (0,0689)	0,676 (0,036)
PI_{ABS}	0,609 (0,081)	0,058** (0,025)	0,080** (0,023)	0,047** (0,025)	0,060** (0,024)

Les valeurs () représentent l'écart type

La fluorescence induite de la *Chl a* ainsi que les paramètres de sa cinétique mesurés par HANDY PEA, ont fourni des informations sur la structure du photosystème II. Nous avons constaté que la courbe de montée polyphasique de la fluorescence de la chlorophylle diminue avec la nano Al_2O_3 , le Cr(VI), et le Cr(VI) combiné à la nano Al_2O_3 par comparaison au contrôle (figure 3.9 A et B). Certaines altérations dans les paramètres de la cinétique ont été observées. Nous avons remarqué que le Cr(VI) réduit significativement ($p < 0,01$) le rendement quantique maximal du PSII (F_v/F_m) de 21,6 % et 36,4 % avec le Cr (VI) à 5 et 10 mg/L, respectivement par rapport au contrôle (tableau 3.3 A). Nous avons également constaté une légère diminution de F_v/F_m de 6,1 et de 8,7 % avec la nano Al_2O_3 à 10 et 100 mg/L, respectivement, par rapport au contrôle (tableau 3.3 A). L'ajout de la nano Al_2O_3 n'a pas affecté la toxicité du Cr(VI) en ce qui concerne le ratio F_v/F_m . Le Cr(VI) combiné à la nano Al_2O_3 a significativement ($p < 0,01$) diminué le ratio F_v/F_m relativement au contrôle, de 35,4 %, 26,7 %, 38,4 % et 36,0 % avec la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 100 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L, et la nano Al_2O_3 100 mg/L- Cr(VI) 10 mg/L, respectivement (tableau 3.3 B). En plus la performance de la photosynthèse (PI_{ABS}) a également été significativement ($p < 0,01$) inhibée de 89,6 % et 90,5 % avec le Cr(VI) à 5 et 10 mg/L, respectivement (tableau 3.3 A). La nano Al_2O_3 a également entraîné une inhibition significative ($p < 0,01$) de la PI_{ABS} de 56,5 % et 79,4 % avec la nano Al_2O_3 à 10 et 100 mg/L, respectivement relativement au contrôle (tableau 3.3 A). Nous avons constaté même en présence de la nano Al_2O_3 , le Cr(VI) inhibe significativement ($p < 0,01$) la PI_{ABS} par comparaison au contrôle. Une inhibition de 90,4 %, 87,0 %, 92,3 % et 90,2 % a été observée avec la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 100 mg/L- Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 10 mg/L- Cr(VI) 10 mg/L, et la nano Al_2O_3 100 mg/L- Cr(VI) 10 mg/L, respectivement par rapport au contrôle (tableau 3.3 B).

Le Cr(VI) a causé une augmentation significative du ratio ABS/RC et du F_o/F_m . Une augmentation de 41,5 % et 37,5 % du ratio ABS/RC a été observée avec le Cr(VI) à 5 et 10 mg/L, respectivement (tableau 3.3 A) en comparaison avec le contrôle. Le Cr(VI) associé à la nano Al_2O_3 a montré une augmentation significative ($p < 0,01$) du ratio ABS/RC de 43,1 %, 39,0 %, 43,2, % et 42,1 % avec la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 100 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L, et la nano Al_2O_3 100 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L, respectivement relativement au contrôle (tableau 3.3 B). La nano Al_2O_3 à 100 mg/L a également causé une

augmentation significative ($p < 0,01$) de l'ABS/RC de 13,1 % par rapport au contrôle (tableau 3.3 A). Le Cr(VI) a considérablement affecté le ratio Fo/Fm, avec une augmentation significative ($p < 0,01$) de 57,9 % et 97,7 % observée avec le Cr(VI) 5 et 10 mg/L, respectivement, par rapport au contrôle (tableau 3.3 A). En présence de la nano Al_2O_3 , le Cr(VI) a augmenté le ratio Fo/Fm de 95,0 %, 71,7 %, 103,1 %, 96,8 % avec la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 100 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L, la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L, et la nano Al_2O_3 100 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L, respectivement par comparaison au contrôle (tableau 3.3 B). Nous avons constaté une augmentation (pas de manière significative) de 23,5 % du ratio Fo/Fm avec la nano Al_2O_3 10 mg/L-Cr(VI) 5 mg/L par rapport au Cr(VI) seul à 5 mg/L (tableau 3.3 B). Une augmentation de Vj a également été constatée avec le Cr(VI) en présence et en absence de la nano Al_2O_3 (tableau 3.3 A et B). La nano Al_2O_3 aussi dans toutes ses concentrations utilisées a également augmenté Vj (tableau 3.3 A).

3.5 Effet du Cr(VI) et nano Al₂O₃ sur la production de ROS

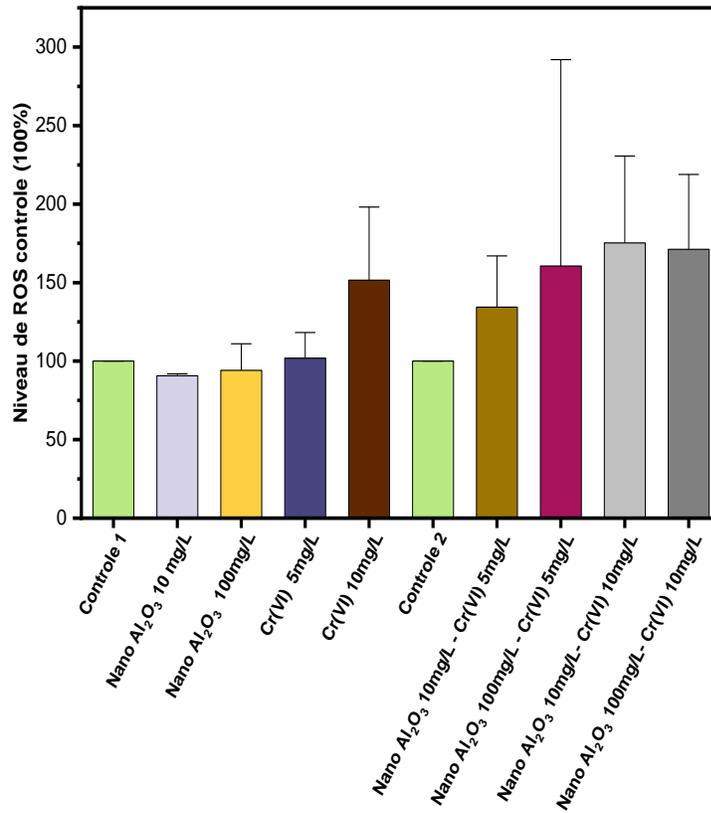


Figure 3.10 : Production de ROS intracellulaire dans les plantes *Lemna minor* après 7 jours d'exposition à différentes concentrations du Cr(VI) (5 et 10 mg/L) et de la nano Al₂O₃ (10 et 100 mg/L). Les valeurs représentent la moyenne écart type pour n=6. Les différences significatives ont été déterminées à p < 0,05. L'augmentation de niveau de ROS n'est pas statistiquement significative.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

4.1 Caractérisation de la nanoparticule

Il était important au cours de ce travail, de connaître les propriétés physico-chimiques de la nano Al_2O_3 . La XRD a révélé des pics très fins du Cristal, avec un pourcentage de cristallinité de 54,3 % (figure 3.1) c'est ce qui confirme que la molécule Al_2O_3 utilisée au cours de ce travail est une nanoparticule qui se trouve sous la forme delta. La nano Al_2O_3 existe sous différentes formes parmi lesquelles Alpha, Gamma, Theta, Etha et Delta (Wang, X. *et al.*, 2015; Zea, 2017). La forme Delta de la nano Al_2O_3 fait partie des formes métastables de la nano Al_2O_3 (Zea, 2017).

La réactivité de la surface est essentielle pour les interactions des nanomatériaux avec d'autres molécules. La FTIR a été efficace dans ce travail, pour révéler les groupements fonctionnels à la surface de la nano Al_2O_3 . L'analyse de FTIR sur la poudre nano Al_2O_3 a indiqué la formation de groupement hydroxyle à $3475,0 \text{ cm}^{-1}$ ainsi que le groupement carboxyle à $1643,01 \text{ cm}^{-1}$ (figure 3.2 A). En revanche, l'interaction de la nano Al_2O_3 (sans être combiné au Cr(VI)), donc seule et le milieu de culture contenant les plantes après 7 jours d'incubations a conduit à une faible intensité de la bande située entre (3500 et 3000 cm^{-1}) (figure 3.2 B) par rapport à la bande $3475,05 \text{ cm}^{-1}$ observée pour la poudre nano Al_2O_3 (figure 3.2 A). L'interaction de la nano Al_2O_3 à 10 mg/L et du Cr(VI) à 5 mg/L , ainsi que Al_2O_3 à 100 mg/L et du Cr(VI) à 10 mg/L dans le milieu de culture a conduit à la perte de formation du groupement hydroxyle par rapport à d'autres conditions (figure 3.2 B). L'interaction entre la nano Al_2O_3 à 100 mg/L et le Cr(VI) à 10 mg/L a également conduit à la perte de formation de certains pics (figure 3.2 B). Ces effets pourraient être dus à l'attachement des ions Cr(VI) sur le groupement hydroxyle et carboxyle de la nano Al_2O_3 . En effet, la littérature indique que les ions Cr s'attachent à la racine des plantes par les groupements hydroxyle et carboxyle (Wen *et al.*, 2018; Zhang, X.-B. *et al.*, 2008). Étant donné que, la nano Al_2O_3 possède également ces groupements fonctionnels, nous estimons que les ions Cr(VI) se sont fixés aux groupements fonctionnels de la nano Al_2O_3 et ce qui a entraîné une altération dans l'intensité des pics. On peut remarquer sur la figure 3.2 B que certaines conditions présentent de pics avec les transmittances élevées alors que dans les autres conditions les mêmes pics présentent la diminution

de la transmittance. Cela pourrait dû à l'effet de l'arrière-plan (background). Peut-être que le background utilisé (section 2.6.2) absorbe plus que les polluants (la nano Al₂O et le Cr(VI)).

La DLS permet de déterminer la distribution de la taille de nanoparticules et de vérifier si les nanoparticules s'agglomèrent (García *et al.*, 2012). Le résultat de ce travail sur la DLS, indique que la nano Al₂O₃ s'agglomère dans l'eau nanopure ainsi que dans le milieu de culture (tableau 3.1), qui a conduit à l'augmentation de la taille hydrodynamique. L'augmentation de la taille hydrodynamique de la Al₂O₃ a également été observée dans l'eau et le milieu de culture dans l'étude de (Wei *et al.*, 2014). L'agglomération pourrait dépendre de plusieurs facteurs tels que, la force ionique de la solution, le pH et la charge de surface (Jiang *et al.*, 2009; Murdock *et al.*, 2008). Les résultats du potentiel zêta dans ce travail, indique que les particules s'agglomèrent car les valeurs faibles de potentiel zêta (tableau 3.1) se rapprochent de zéro.

4.2 Évaluation sur la physiologie de plante

4.2.1 Effet du Cr(VI) et de la nano Al₂O₃ sur la croissance

Le Cr(VI) est connu pour être très nocif pour les plantes (Reale *et al.*, 2016). Les résultats de ce travail indiquent que le Cr(VI) est toxique en inhibant de manière significative la croissance par rapport au contrôle. Le Cr (VI) diminue le nombre de frondes et le poids frais de la plante *Lemna minor* de plus de 50 % relativement au contrôle (figure 3.4 A et B). Une réduction du nombre de frondes de plantes *Lemna minor* incubées avec le Cr (VI) a été observée dans l'étude de (Reale *et al.*, 2016). Le Cr(VI) a causé une inhibition de 50 % du nombre de feuilles chez *O. sativa* (Sundaramoorthy *et al.*, 2010). Une réduction du nombre de feuilles a aussi été observée chez *Prosopis laevigatar* (Buendía-González *et al.*, 2010). Une réduction du poids frais de la plante par le Cr(VI) a été observée chez *Lemna gibba* (Ali *et al.*, 2006). Chez *Phaseolus vulgaris*, une réduction de la biomasse de la feuille a été observée (Poschenrieder *et al.*, 1993). Il a été rapporté que la toxicité du Cr(VI) semble être due à sa perméabilité rapide à travers la membrane biologique, suivie de ses interactions avec les protéines et les acides nucléiques (Reale *et al.*, 2016). La réduction dans le taux de croissance serait due, au niveau cellulaire, à une inhibition de la division cellulaire ou de l'élongation, résultant d'un stress oxydatif (Karuppanapandian et Kim, 2013; Palit *et al.*, 1994). Les résultats sur le nombre de frondes et le poids frais indiquent que le Cr(VI) a

conservé ses propriétés toxiques même en présence de la nano Al_2O_3 (Figure 3.4 A et B). Toutefois, la nano Al_2O_3 en absence du Cr(VI) n'a montré aucune inhibition du nombre de frondes et du poids, au contraire une légère augmentation (non significative) (Figure 3.4 A et B). Ce résultat concorde avec l'étude d'Owji et ses collègues qui ont étudié l'effet de la nano et macro Al_2O_3 sur le *Trigonella foenum-graceum* en cultures in vitro, ils ont observé que la nano Al_2O_3 augmentait le nombre de feuilles, le poids frais de la plante et des racines. Ils ont attribué cette capacité de la nano Al_2O_3 à augmenter la croissance à la taille des particules. En effet, dans la même étude, l'effet de la macro-particule de l' Al_2O_3 a été également étudié, une diminution significative de la croissance a été observée. (Owji *et al.*, 2019).

La longueur des racines est considérée comme l'un des indicateurs standards de phytotoxicité par l'agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA) (Tripathi *et al.*, 2017). L'évaluation sur la longueur des racines dans ce travail a montré une perte des racines dans tous les tests contenant du Cr(VI) en présence et en absence de la nano Al_2O_3 après 7 jours d'incubation, par rapport à la longueur de racines au jour 0 (tableau 3.2, figure 3.5 A-F, 3.6 A-F). La toxicité du Cr(VI) sur la longueur des racines a été rapportée dans certaines études, telles que chez *T. aestivum*, une réduction de la longueur des racines a été observée (Ghani *et al.*, 2015). Une réduction de la croissance des racines a également été rapportée chez *Oryza. sativa L* (Sundaramoorthy *et al.*, 2010). Il a été rapporté que l'accumulation du Cr dans les différentes parties de la plante se fait selon l'ordre suivante : racine > tige > feuilles > graine (Tiwari *et al.*, 2009). Les résultats de microanalyse de Reale et ses collègues dans leur étude sur le Cr(VI) suggèrent que le Cr s'est accumulé en petite quantité uniquement dans les frondes (Reale *et al.*, 2016). Ils ont également suggéré, selon l'étude de (Nematshahi *et al.*, 2012) chez *Allium cepa*, que le Cr s'accumule d'abord dans les racines, puis transporté successivement vers la partie aérienne de la plante, où il peut avoir un impact direct sur le métabolisme cellulaire des pousses. Une autre étude a découvert que les graines de haricot accumulaient environ 0,1 % de Cr, tandis que les racines en accumulaient 98 % (Huffman Jr et Allaway, 1973). Une autre étude du Cr(VI) chez *Lolium perenne* a montré que le Cr s'accumulait dans les racines 10 fois plus que dans les feuilles (Vernay *et al.*, 2007). Il a été rapporté que le contact du Cr(VI) et les racines des plantes pourrait induire à la production de stress éthylénique dans les racines et le transporter vers la tige (Shahid *et al.*, 2017; Shinwari *et al.*, 2015). Le stress éthylénique provoque de sérieux dommages cellulaires, et ces dommages se produisent

d'abord dans les racines, ce qui fait que les racines des plantes subissent le stress du Cr plutôt que la tige et les pousses. Sous l'influence du Cr, la structure de la paroi cellulaire des racines des plantes change, ainsi que la teneur en cellulose. En conséquence, le groupe hydroxyle et le groupe carboxyle libre dans la composition des polysaccharides augmentent et lient davantage le Cr(VI), le confinant ainsi sur le site, ce qui réduit la quantité de translocation vers la partie supérieure morphologique. En conséquence, le système racinaire accumule plus de Cr (Ao *et al.*, 2022). Cela pourrait expliquer la perte des racines dans notre étude causée par le Cr(VI) en présence et en absence de la nano Al₂O₃ (figure 3.6 B). Il a été proposé que le Cr(VI) interagit avec les groupements hydroxyle et carboxyle de la racine de plantes (Ao *et al.*, 2022; Wen *et al.*, 2018; Zhang, X.-B. *et al.*, 2008). Par la FTIR nous avons observé que la poudre nano Al₂O₃ possédait les groupements hydroxyle et carboxyle (figure 3.2). L'interaction de la nano Al₂O₃ et le milieu de culture qui contenait les plantes, a montré la présence de groupement hydroxyle. En revanche, l'interaction du Cr(VI) à 10 mg/L avec la nano Al₂O₃ à 100 mg/L dans le milieu de culture qui contenait les plantes, a montré une perte de formation du groupement hydroxyle (figure 3.2 B). Nous estimons que le Cr(VI) a d'abord interagi avec le groupement hydroxyle de la nano Al₂O₃, ce dernier a facilité l'adsorption du Cr(VI) dans la racine des plantes. Nous estimons également que le Cr(VI) adsorbé sur la nano Al₂O₃ à 100 mg/L pourrait être très réactif, ce qui pourrait expliquer la perte dans l'intensité de pic du groupement fonctionnel observé dans la figure 3.2 B et l'augmentation de la taille hydrodynamique observée à cette même condition (tableau 3.1 B). Bien que la nano Al₂O₃ n'ait pas affecté la toxicité du Cr(VI) en fonction de la longueur des racines, nous avons observé une légère augmentation (non significative) de 8,5 % dans la longueur des racines des plantes traitées avec la nano Al₂O₃ à 100 mg/L. Ce qui concorde avec l'étude d'Owji et ses collègues, qui a montré que la nano Al₂O₃ augmentait la longueur des racines, mais de manière non significative, sur *Trigonella foenum-graceum* (Owji *et al.*, 2019).

Nous avons observé que la nano Al₂O₃ a réduit la toxicité du Cr(VI) d'une façon significative sur le pourcentage d'inhibition de taux de croissance avec la nano Al₂O₃ 10 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L par rapport au Cr(VI) seul à 10 mg/L (Figure 3.7). Cependant, cette diminution a ramené le Cr(VI) à 10 mg/L presque à un niveau presque équivalent à celui du Cr(VI) à 5 mg/L. Une concentration du Cr(VI) à 5 mg/L produit des effets néfastes sur la croissance de la plante.

4.2.2 Effet sur du Cr(VI) et de la nano Al₂O₃ les pigments photosynthétiques

Les pigments photosynthétiques jouent un rôle très important dans le processus de la photosynthèse en absorbant l'énergie lumineuse (Mauzerall, 1976). Dans ce travail, le Cr(VI) a négativement impacté la teneur de la *Chl a*, le ratio *Chl a/Chl b* et les caroténoïdes, en présence et en absence de la nano Al₂O₃ (figure 3.8 A, C et D). La *Chl a* a été inhibée de 45 -50 % par le Cr(VI) en présence et en absence de la nano Al₂O₃. Bien que, nous ayons observé une légère augmentation de la *Chl b*, le ratio *Chl a/Chl b* diminue avec le Cr(VI), en présence et en absence de la nano Al₂O₃ (figure 3.8 D). Il a été observé que le Cr(VI) diminue la teneur en *Chl a* chez le riz de 17-47 % et les caroténoïdes de 31 -50 % par rapport au riz contrôle (Ahmad *et al.*, 2011). Une autre étude sur le Cr(VI) et *Lemna gibba* a également montré une réduction de la chlorophylle (Ali *et al.*, 2006). Les caroténoïdes, qui jouent un rôle protecteur du système photosynthétique contre la lumière excessive et les métaux traces (Krayem *et al.*, 2021) ont été aussi inhibés par le Cr(VI) en présence et en absence de la nano Al₂O₃ (figure 3.8 D). Il a été rapporté que la réduction des pigments photosynthétiques serait due au stress métallique. Ce qui est très courant dans le chloroplaste et joue un rôle important dans la modification de nombreuses voies métaboliques à travers le processus biochimique et physiologique (Khan *et al.*, 2019). La réduction de la teneur en chlorophylle est due à la substitution des ions magnésium (Mg²⁺) au centre par les ions métalliques. De plus, l'accumulation excessive de métaux peut également entraîner une activité plus élevée de la chlorophyllase et la destruction de la structure des chloroplastes (Kakkalameli *et al.*).

Contrairement aux aspects phénotypiques de la plante *Lemna minor*, la nano Al₂O₃ seule a eu de l'impact négatif sur la teneur en *Chl a* et en caroténoïdes. Nous avons observé une diminution significative ($p < 0,01$) de la *Chl a* par rapport au contrôle avec la nano 10 et 100 mg/L (figure 3.8 A). Le ratio *Chl a/Chl b* a également été affecté par la nano Al₂O₃ ainsi que les caroténoïdes. Peu d'études sont connues de l'impact de nano Al₂O₃ sur les pigments chlorophylliens. Nous estimons que la réduction de pigments photosynthétiques, causée par la nano Al₂O₃, pourrait être due à l'affinité de la nano Al₂O₃ avec le complexe du photosystème II (Juhel *et al.*, 2011).

Cette étude a montré que l'interaction de nano à 100 mg/L et de Cr(VI) à 10 mg/L diminue la *Chl a* (de 18 %) ainsi que le ratio *Chl a/b* comparé au Cr(VI) seul à 10 mg/L. Nous estimons que, la nano Al₂O₃ à 100 mg/L facilite l'adsorption du Cr(VI) dans la plante. Ce résultat de la *Chl a* peut-

être corrélé à l'augmentation de la taille hydrodynamique de la nano 100 mg/L qui était en interaction avec le Cr(VI) 10 mg/L où la taille hydrodynamique de la nano Al₂O₃ a augmenté au jour 4 (Tableau 3.1).

4.2.3 Effet du Cr(VI) et de la nano Al₂O₃ sur efficacité de la photosynthèse

Il a été rapporté que les métaux lourds tels que les ions cadmium, cuivre et chrome, inhibent directement les transports des électrons du PSII au niveau du système de séparation de l'eau du RC (centre réactionnel) (Ali *et al.*, 2006 ; Küpper *et al.*, 2002 ; Popovic *et al.*, 2003). Ce travail indique que le Cr(VI), en présence et en absence de la nano inhibe les paramètres cinétiques de fluorescence de la *Chl a* (tableau 3.3 A et B). Nous pouvons confirmer que les variations des certains paramètres de fluorescence de la *Chl a* liés à la photosynthèse sont indicatives d'une altération de l'intégrité fonctionnelle du PSII causée par les effets du Cr(VI). Le Cr(VI) a eu de l'effet sur l'indice de performance de l'activité de PSII (PI_{ABS}) (tableau 3.3 A et B), qui représente un indicateur intégratif de toutes les réactions photochimiques du PSII (Strasser *et al.*, 2004). Le rendement quantique maximale du PSII (F_v/F_m) a également été inhibé, ce qui corrèle avec l'inhibition de PI_{ABS}. Nous remarquons que le PI_{ABS} et le ratio F_v/F_m ont baissé par rapport au contrôle (tableau 3.3 A et B). La diminution du ratio F_v/F_m causée par le Cr(VI) sur la plante *Lemna* a également été observée par (Reale *et al.*, 2016). Le Cr(VI) augmente le ratio ABS/RC qui permet d'évaluer l'absorption des antennes collectrices par le centre réactionnel actif du PSII (tableau 3.3 A et B). Ce résultat d'ABS/RC peut être corrélé avec celui du F_o/F_m. Ces deux paramètres augmentent par rapport au contrôle. Il a été rapporté que la baisse du F_v/F_m serait due à l'augmentation de la fluorescence minimale (F_o) (Reale *et al.*, 2016). Comme nous pouvons observer que le ratio F_o/F_m augmente, l'augmentation de F_o est considérée comme une expression de dommages irréversibles au PSII, entraînant une plus grande perte d'énergie par émission de fluorescence, indiquant que les feuilles ont souffert d'un excès de lumière (Bussotti *et al.*, 2011). Il a été suggéré par (Van Assche et Clijsters, 1983) que l'effet global des ions Cr sur la photosynthèse et le transfert d'énergie d'excitation pourraient également être dû aux anomalies induites par le Cr(VI) dans l'ultrastructure des chloroplastes, telle qu'un système lamellaire mal développé avec des thylakoïdes largement espacés et moins de grana.

Il a été également constaté que la nano Al_2O_3 inhibe les paramètres de la cinétique de fluorescence de la *Chl a* (tableau 3.3 A). L'étude de (Juhel *et al.*, 2011) a montré que la nano Al_2O_3 n'a augmenté pas le ratio F_v/F_m de la plante *Lemna minor*, alors que certains paramètres de la fluorescence de la *Chl a* ont présenté une augmentation. Ils ont suggéré que l'effet de la nano n'était pas directement sur le PSII. Des études sur l'affinité de la nano Al_2O_3 et le complexe du PSII pourraient être essentielles pour expliquer la toxicité de la nano Al_2O_3 sur sa toxicité de l'efficacité de la photosynthèse.

4.2.4 Effet du Cr(VI) et de la nano Al_2O_3 sur la production de ROS

Le Cr(VI) provoque la production de ROS dans les tissus de plante (Panda, 2007). L'étude de (Zeng *et al.*, 2014) a montré une production excessive de ROS causée par le Cr(VI) à une concentration de 200 μM . Cependant, dans ce travail la production de ROS par le Cr(VI) en présence et en absence de la nano Al_2O_3 n'était pas significative (figure 3.10). Cela pourrait être dû à une augmentation de réponse antioxydante causée par le Cr(VI). Des études sur *Z. mays*, *Solanum lycopersicum*, et *B. oleracea* suite à des traitements au Cr(VI) ont montré une augmentation des niveaux de glutathion (GSH) dans les racines ainsi que dans les feuilles (Shanker *et al.*, 2004). L'étude de (Yu *et al.*, 2007) a montré une augmentation de l'activité des superoxydes dismutases (SOD) dans les cellules des feuilles après l'exposition au Cr(VI) et une réduction des activités de la catalase (CAT) et de la peroxydase (Yu *et al.*, 2007). L'évaluation de chaque protéine impliquée dans le mécanisme de réponse antioxydante serait essentielle pour comprendre l'effet du Cr(VI) sur la production de ROS dans le cadre de ce travail. La nano Al_2O_3 seule a légèrement réduit le niveau de ROS par rapport au contrôle.

CONCLUSION

Le but de ce travail était d'évaluer l'effet de la nanoparticule d'oxyde aluminium (nano Al₂O₃) sur la toxicité du Cr(VI) en contact avec la plante *Lemna minor*. Les résultats de ce travail indiquent que, la nano Al₂O₃ n'a pas de l'effet sur la toxicité du Cr (VI) sur base du nombre de frondes, poids, frais et la longueur des racines. La toxicité du Cr(VI) est restée la même en présence et en absence de la nano Al₂O₃. Toutefois, la nano Al₂O₃ seule, sans être en interaction avec le Cr(VI) n'a présenté aucun effet négatif sur les propriétés phénotypiques de la plante *Lemna minor*. Un effet significatif de la nano Al₂O₃ à 10 mg/L a réduit le pourcentage d'inhibition de taux de croissance des plantes traitée avec la nano Al₂O₃ 10 mg/L-Cr(VI) 10 mg/L par rapport au Cr(VI) seul à 10 mg/L. La réduction observée est de 60,2 % à 50,02 %, bien que ce résultat sur la réduction du pourcentage l'inhibition de taux de croissance soit significatif, 50,02 % correspondent presque au taux d'inhibition de la croissance de plantes *Lemna minor* causé par le Cr(VI) à 5 mg/L. À une concentration de 5 mg/L, le Cr(VI) présente des effets hautement toxiques. Ce travail a également montré que le Cr(VI) réduit significativement (p<0,01) la teneur en pigments photosynthétiques (*Chl a*, *Chl b*, *Cx+c*) en présence et en absence de la nano Al₂O₃, ainsi que les paramètres de la cinétique de la fluorescence de la *Chl a* tels que la performance de l'indice de la photosynthèse (PI_{ABS}), le rendement quantique maximal du PSII (Fv/Fm). Le résultat sur la diminution de PI_{ABS} et du Fv/Fm corrèle avec l'augmentation du ratio ABS/RC et celui du Fo/Fm. Contrairement aux aspects phénotypiques, la nano Al₂O₃ à 100 mg/L a inhibé la teneur en *Chl a*, en caroténoïdes et le ratio *Chl a/Chl b* d'une manière significative (p<0,01). La nano Al₂O₃ à 10 mg/L a inhibé de façon significative la teneur en *Chl a* (p<0,01) et en caroténoïde (p<0,05). La nano Al₂O₃ seule a aussi inhibé les paramètres de la cinétique de la fluorescence de la *Chl a*.

Les résultats de ce travail peuvent conclure que l'interaction du Cr(VI) et la nano Al₂O₃ dans le milieu aquatique ne modifie en rien les propriétés toxiques du Cr(VI). Les stratégies de traitements de l'eau qui utilisent la nano Al₂O₃ adsorbant le Cr(VI), ne changent pas les propriétés toxiques du Cr(VI).

Comme mentionné dans la partie discussion, les prochaines études pourraient se focaliser sur les études des toutes les protéines impliquées dans les défenses antioxydantes afin de mieux expliquer

les résultats obtenus sur le ROS durant ce travail. L'étude sur l'affinité de la nano Al_2O_3 envers le complexe du photosystème II par la résonance de plasmon serait essentielle pour expliquer la toxicité de la nano Al_2O_3 sur l'efficacité de la photosynthèse par rapport aux aspects phénotypiques qui n'ont présentés aucune toxicité après l'exposition de plantes à la nano Al_2O_3 . La détermination de la structure 3D de la plante *Lemna minor* plus précisément du chloroplaste après l'exposition à la nano Al_2O_3 pourrait également être utile pour fournir les informations sur la structure du chloroplaste afin d'expliquer la toxicité de la nano Al_2O_3 sur l'efficacité de la photosynthèse. Les recherches futures peuvent également se diriger vers l'interaction du Cr(VI) et de la nano Al_2O_3 sur les organismes animaux dans le milieu aquatique.

ANNEXE A

Données supplémentaires : Tests statistiques

Sig = 0 indique que la différence de moyennes n'est pas significative au niveau de 0,05

Sig =1 indique que la différence de moyennes est significative au niveau de 0,05

1- Tests statistiques pour la taille hydrodynamique

	Prob	Alpha	Sig
Al ₂ O ₃ 10 mg/L Jour4 Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L Jour 0	0,06206	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100 mg/L Jour4 Nano Al ₂ O ₃ 100 mg/L Jour 0	0,09531	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L jour 4 Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L jour 0	0,64151	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L jour 4 Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L jour 0	0,98774	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 10mg/L jour 4 Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 10mg/L jour 0	0,64151	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 10mg/L jour 4 Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 10mg/L jour 0	0,00543	0,05	1

2- Tests statistiques pour le potentiel zêta

	Prob	Alpha	Sig
Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L Jour 4 Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L Jour 0	0,02885	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100 mg/L Jour 4 Nano Al ₂ O ₃ 100 mg/L Jour 0	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L jour 4 Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L jour 0	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L jour 4 Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L jour 0	0,00197	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 10mg/L jour 4 Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 10mg/L jour 0	1,40E-04	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 10mg/L jour 4 Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 10mg/L jour 0	<0.0001	0,05	1

3- Tests statistiques pour le nombre de frondes

	Prob	Alpha	Sig
Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L Controle 1	0,97514	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Controle 1	0,79585	0,05	0
Nano 100mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,99994	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,97947	0,05	0
Controle 2 Controle 1	1	0,05	0
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,90195	0,05	0
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,61115	0,05	0
Controle 2 Cr(VI) 5mg/L	<0.0001	0,05	1
Controle 2 Cr(VI) 10mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,99999	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99917	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99474	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99836	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,99961	0,05	0

Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99998	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99998	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0

4- Tests statistiques pour le poids frais

	Prob	Alpha	Sig
Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L Controle 1	0,99754	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Controle 1	0,24816	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,75927	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,99961	0,05	0
Controle 2 Controle 1	0,88545	0,05	0
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,3833	0,05	0
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,00551	0,05	1
Controle 2 Cr(VI) 5mg/L	<0.0001	0,05	1
Controle 2 Cr(VI) 10mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99996	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99999	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1

Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99999	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,99999	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0

5- Tests statistiques pour le % d'inhibition de taux de croissance

	Prob	Alpha	Sig
Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L Controle 1	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Controle 1	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	1	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,00124	0,05	1
Controle 2 Controle 1	1	0,05	0
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	1	0,05	0
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	1	0,05	0
Controle 2 Cr(VI) 5mg/L	<0.0001	0,05	1
Controle 2 Cr(VI) 10mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,99839	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,01419	0,05	1

Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,00308	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99996	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,99992	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,00684	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,5589	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,29304	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,95521	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,74356	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L	0,87732	0,05	0

6- Tests statistiques pour la longueur des racines

	Prob	Alpha	Sig
Controle jour 7 Controle Jour 0	0,90572	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L jour 7 Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L Jour 0	0,6722	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L jour 4 Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L jour 0	0,61179	0,05	0

7- Tests statistiques pour la teneur en *Chl a*

	Prob	Alpha	Sig
Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L Controle 1	0,00763	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	1,21E-04	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,01661	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,0033	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,99988	0,05	0
Controle 2 Controle 1	0,79016	0,05	0
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Controle 2 Cr(VI) 5mg/L	<0.0001	0,05	1
Controle 2 Cr(VI) 10mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,03074	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99811	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,01	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99999	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99999	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,00632	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99986	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,16768	0,05	0

Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,44902	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,10211	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,23969	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L	0,31866	0,05	0

8- Tests statistiques pour la teneur en *Chl b*

	Prob	Alpha	Sig
Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L Controle 1	0,95894	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Controle 1	0,26158	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,94106	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Controle 1	0,99994	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,99921	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,57287	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Controle 1	1	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,98328	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,34471	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Controle 2 Controle 1	0,9999	0,05	0
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,72727	0,05	0
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,08316	0,05	0
Controle 2 Cr(VI) 5mg/L	0,98333	0,05	0
Controle 2 Cr(VI) 10mg/L	0,99921	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,98219	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,33903	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	0,9993	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	0,99999	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,99756	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,49946	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	0,99217	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	1	0,05	0

Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,89811	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,17414	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,99897	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99972	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	0,86088	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,1694	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,00613	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,5479	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,77901	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	0,99071	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,78473	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,62166	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L	0,93743	0,05	0

9- Tests statistiques pour le ratio *Chl a/Chl b*

	Prob	Alpha	Sig
Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L Controle 1	0,99226	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Controle 1	0,01145	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,12867	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,97107	0,05	0
Controle 2 Controle 1	1	0,05	0
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,96253	0,05	0
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,00552	0,05	1
Controle 2 Cr(VI) 5mg/L	<0.0001	0,05	1
Controle 2 Cr(VI) 10mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1

Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,99999	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99883	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,99999	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99896	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,90494	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,98923	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99004	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,01187	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,20219	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,03671	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,03778	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L	0,32425	0,05	0

10- Tests statistiques pour la teneur en Caroténoïdes

	Prob	Alpha	Sig
Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L Controle 1	0,03555	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,01829	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1

Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Controle 2 Controle 1	0,79399	0,05	0
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	2,65E-04	0,05	1
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Controle 2 Cr(VI) 5mg/L	<0.0001	0,05	1
Controle 2 Cr(VI) 10mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	3,85E-04	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,9988	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99695	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	9,42E-04	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,98682	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,97606	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	3,21E-04	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,99936	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99822	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,00319	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,90055	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,86098	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	<0.0001	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99938	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99999	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L	0,99883	0,05	0

11- Tests statistiques pour la production de ROS

	Prob	Alpha	Sig
Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L Controle 1	0,99998	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Controle 1	1	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	1	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Controle 1	1	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,99989	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,99999	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Controle 1	0,25048	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,09323	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,1379	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,29937	0,05	0
Controle 2 Controle 1	1	0,05	0
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,99998	0,05	0
Controle 2 Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	1	0,05	0
Controle 2 Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Controle 2 Cr(VI) 10mg/L	0,25048	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	0,7732	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,47115	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,58607	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,82642	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99708	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	0,7732	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	0,09638	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,02957	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,04671	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,12078	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99998	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 2	0,09638	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,94629	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	0,01395	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,00342	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,00583	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,01848	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,97028	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	0,01395	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,57006	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99909	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	0,0246	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,00636	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,01064	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,03217	0,05	1

Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99157	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 2	0,0246	0,05	1
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,70258	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99993	0,05	0
Nano Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Nano Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0

12- Tests statistiques pour le ratio Fv/Fm

	Prob	Alpha	Sig
Al ₂ O ₃ 10 mg/L Controle 1	0,89362	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L Controle 1	0,54259	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,99971	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Controle 1	5,04E-04	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,02403	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,10131	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,03456	0,05	1
Controle Controle 1	1	0,05	0
Controle Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,89362	0,05	0
Controle Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,54259	0,05	0
Controle Cr(VI) 5mg/L	5,04E-04	0,05	1
Controle Cr(VI) 10mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,06104	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	9,62E-04	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,00518	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,96067	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,39635	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,54717	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1

Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,01052	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99997	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99907	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,17566	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1

13- Tests statistiques pour PI_{ABS}

	Prob	Alpha	Sig
Al ₂ O ₃ 10 mg/L Controle 1	3,12E-04	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,49119	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,0897	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,99197	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,07416	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,9854	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Controle Controle 1	1	0,05	0
Controle Al ₂ O ₃ 10 mg/L	3,12E-04	0,05	1
Controle Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Controle Cr(VI) 5mg/L	<0.0001	0,05	1
Controle Cr(VI) 10mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,07569	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,98625	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,15145	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,99918	0,05	0

Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,05069	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,96194	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99995	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,0788	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,98782	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0

14- Tests statistiques pour le ratio ABRs/RC

	Prob	Alpha	Sig
Al ₂ O ₃ 10 mg/L Controle 1	0,6114	0,05	0
N Al ₂ O ₃ 100mg/L Controle 1	0,01085	0,05	1
NAI2O3 100mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,57487	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,96389	0,05	0
Controle Controle 1	1	0,05	0
Controle Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,6114	0,05	0
Controle N Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,01085	0,05	1
Controle Cr(VI) 5mg/L	<0.0001	0,05	1
Controle Cr(VI) 10mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1

Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,99996	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,78003	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,99862	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99998	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,95471	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,99992	0,05	0

15- Tests statistiques pour le ratio Fo/Fm

	Prob	Alpha	Sig
Al ₂ O ₃ 10 mg/L Controle 1	0,89362	0,05	0
N Al ₂ O ₃ 100mg/L Controle 1	0,54259	0,05	0
N Al ₂ O ₃ 100mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,99971	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Controle 1	5,04E-04	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,02403	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,10131	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,03456	0,05	1
Controle Controle 1	1	0,05	0
Controle Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,89362	0,05	0
Controle N Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,54259	0,05	0
Controle Cr(VI) 5mg/L	5,04E-04	0,05	1
Controle Cr(VI) 10mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,06104	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle	<0.0001	0,05	1

Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	9,62E-04	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,00518	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,96067	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,39635	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,54717	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,01052	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99997	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle	<0.0001	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99907	0,05	0

16- Tests statistiques pour Vj

	Prob	Alpha	Sig
Al ₂ O ₃ 10 mg/L Controle 1	0,02146	0,05	1
N Al ₂ O ₃ 100mg/L Controle 1	0,00162	0,05	1
N Al ₂ O ₃ 100mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,99039	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L Controle 1	0,00186	0,05	1
Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,9934	0,05	0
Cr(VI) 5mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	1	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Controle 1	0,0538	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,99999	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,9236	0,05	0
Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,93829	0,05	0
Controle Controle 1	1	0,05	0
Controle Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,02146	0,05	1
Controle N Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,00162	0,05	1
Controle Cr(VI) 5mg/L	0,00186	0,05	1
Controle Cr(VI) 10mg/L	0,0538	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	0,12718	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,99832	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,74242	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,77173	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99999	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle	0,12718	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle 1	0,08887	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,99976	0,05	0

Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,83415	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,85793	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Controle	0,08887	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	0,0366	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L N Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,96387	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,97244	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle	0,0366	0,05	1
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99988	0,05	0
Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	0,99999	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle 1	0,18433	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10 mg/L	0,99172	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L	0,62583	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 5mg/L	0,65845	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Cr(VI) 10mg/L	0,99983	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Controle	0,18433	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 100mg/L - Cr(VI) 5mg/L	1	0,05	0
Al ₂ O ₃ 100mg/L- Cr(VI) 10mg/L Al ₂ O ₃ 10mg/L- Cr(VI) 10mg/L	0,99878	0,05	0

RÉFÉRENCES

- Abbas, H. H. et Ali, F. K. (2007). Study the effect of hexavalent chromium on some biochemical, citotoxicological and histopathological aspects of the *Oreochromis* spp. fish. *Pakistan journal of biological sciences: PJBS*, 10(22), 3973-3982.
- Acar, F. et Malkoc, E. (2004). The removal of chromium (VI) from aqueous solutions by *Fagus orientalis* L. *Bioresource technology*, 94(1), 13-15.
- Afkhami, A., Bagheri, H. et Madrakian, T. (2011). Alumina nanoparticles grafted with functional groups as a new adsorbent in efficient removal of formaldehyde from water samples. *Desalination*, 281, 151-158.
- Afkhami, A., Saber-Tehrani, M. et Bagheri, H. (2010). Simultaneous removal of heavy-metal ions in wastewater samples using nano-alumina modified with 2, 4-dinitrophenylhydrazine. *Journal of hazardous materials*, 181(1-3), 836-844.
- Ahmad, M., Wahid, A., Ahmad, S. S., Butt, Z. A. et Tariq, M. (2011). Ecophysiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) to hexavalent chromium. *Pak. J. Bot.*, 43(6), 2853-2859.
- Ali, N. A., Dewez, D., Didur, O. et Popovic, R. (2006). Inhibition of photosystem II photochemistry by Cr is caused by the alteration of both D1 protein and oxygen evolving complex. *Photosynthesis Research*, 89, 81-87.
- Almehdi, A., El-Keblawy, A., Shehadi, I., El-Naggar, M., Saadoun, I., Mosa, K. A. et Abhilash, P. C. (2019). Old leaves accumulate more heavy metals than other parts of the desert shrub *Calotropis procera* at a traffic-polluted site as assessed by two analytical techniques. *International journal of phytoremediation*, 21(12), 1254-1262.
- Altay, A., Bayhan, H. et Akca, L. (1996). Nutrient removal efficiency of the natural treatment system utilizing duckweed. 1st Uludag Environmental Engineering Symposium, Bursa,
- Amin, H., Arain, B. A., Amin, F. et Surhio, M. A. (2013). Phytotoxicity of chromium on germination, growth and biochemical attributes of *Hibiscus esculentus* L. *American Journal of Plant Sciences*, 2013.
- Anderson, R. A. et Kozlovsky, A. S. (1985). Chromium intake, absorption and excretion of subjects consuming self-selected diets. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 41(6), 1177-1183.
- Ao, M., Chen, X., Deng, T., Sun, S., Tang, Y., Morel, J. L., Qiu, R. et Wang, S. (2022). Chromium biogeochemical behaviour in soil-plant systems and remediation strategies: A critical review. *Journal of hazardous materials*, 424, 127233.

- Aramesh, M., Tran, P. A., Ostrikov, K. K. et Prawer, S. (2017). Conformal nanocarbon coating of alumina nanocrystals for biosensing and bioimaging. *Carbon*, 122, 422-427.
- Armienta-Hernández, M. A. et Rodríguez-Castillo, R. (1995). Environmental exposure to chromium compounds in the valley of León, México. *Environmental Health Perspectives*, 103(suppl 1), 47-51.
- Arvidsson, P.-O. et Sundby, C. (1999). A model for the topology of the chloroplast thylakoid membrane. *Functional Plant Biology*, 26(7), 687-694.
- Awan, N., Fatima, A., Farhan, M. et Awan, N. (2019). Comparative analysis of chromium and cadmium in various parts of wheat and maize. *Pol. J. Environ. Stud*, 28, 1561-1566.
- Bassi, M., Corradi, M. et Realini, M. (1990). Effects of chromium (VI) on two freshwater plants, *Lemna minor* and *Pistia stratiotes*. 1. Morphological observations.
- Bhalerao, S. A. et Sharma, A. S. (2015). Chromium: As an environmental pollutant. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 4(4), 732-746.
- Bharti, R. et Sharma, R. (2022). Effect of heavy metals: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 51, 880-885.
- Bhattacharya, A., Naiya, T., Mandal, S. et Das, S. (2008). Adsorption, kinetics and equilibrium studies on removal of Cr (VI) from aqueous solutions using different low-cost adsorbents. *Chemical engineering journal*, 137(3), 529-541.
- Bhusari, V., Dahake, R., Rayalu, S. et Bansiwala, A. (2016). Comparative study of removal of hexavalent chromium from water using metal oxide nanoparticles. *Advances in Nanoparticles*, 5(1), 67-74.
- Borbane, S., Pande, V., Vibhute, S., Kendre, P. et Dange, V. (2015). Design and fabrication of ordered mesoporous alumina scaffold for drug delivery of poorly water soluble drug. *Austin Therapeutics*, 2(1), 1015.
- Borowiak-Resterna, A., Cierpiszewski, R. et Prochaska, K. (2010). Kinetic and equilibrium studies of the removal of cadmium ions from acidic chloride solutions by hydrophobic pyridinecarboxamide extractants. *Journal of hazardous materials*, 179(1-3), 828-833.
- Briffa, J., Sinagra, E. et Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9).
- Buendía-González, L., Orozco-Villafuerte, J., Cruz-Sosa, F., Barrera-Díaz, C. et Vernon-Carter, E. (2010). *Prosopis laevigata* a potential chromium (VI) and cadmium (II) hyperaccumulator desert plant. *Bioresource technology*, 101(15), 5862-5867.

- Bussotti, F., Desotgiu, R., Cascio, C., Pollastrini, M., Gravano, E., Gerosa, G., Marzuoli, R., Nali, C., Lorenzini, G. et Salvatori, E. (2011). Ozone stress in woody plants assessed with chlorophyll a fluorescence. A critical reassessment of existing data. *Environmental and experimental botany*, 73, 19-30.
- Büyükokuroğlu, M., Gülçin, I., Oktay, M. et Küfrevioğlu, O. (2001). In vitro antioxidant properties of dantrolene sodium. *Pharmacological Research*, 44(6), 491-494.
- Caliman, F. A., Robu, B. M., Smaranda, C., Pavel, V. L. et Gavrilescu, M. (2011). Soil and groundwater cleanup: benefits and limits of emerging technologies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13, 241-268.
- Cervantes, C., Campos-García, J., Devars, S., Gutiérrez-Corona, F., Loza-Tavera, H., Torres-Guzmán, J. C. et Moreno-Sánchez, R. (2001). Interactions of chromium with microorganisms and plants. *FEMS microbiology reviews*, 25(3), 335-347.
- Chandra, P. et Kulshreshtha, K. (2004). Chromium accumulation and toxicity in aquatic vascular plants. *The Botanical Review*, 70(3), 313-327.
- Cheng, J., Landesman, L., Bergmann, B., Classen, J. J., Howard, J. et Yamamoto, Y. (2002). Nutrient removal from swine lagoon liquid by *Lemna minor* 8627. *Transactions of the ASAE*, 45(4), 1003.
- Chitnis, P. R. (2001). Photosystem I: function and physiology. *Annual review of plant biology*, 52(1), 593-626.
- Contreras-Bustos, R., Ramos-Tapia, J. L., Martínez-Hernández, A. L., Jiménez-Becerril, J., Jiménez-Reyes, M. et Cercado, B. (2022). Cr (VI) adsorption by *Lemna minor* considering operational, chemical and biological factors. *revue roumaine de chimie*, 67(8-9), 483-492.
- Corradi, M., Bianchi, A. et Albasini, A. (1993). Chromium toxicity in *Salvia sclarea*—I. Effects of hexavalent chromium on seed germination and seedling development. *Environmental and experimental botany*, 33(3), 405-413.
- Evans, J. R. (2013). Improving photosynthesis. *Plant physiology*, 162(4), 1780-1793.
- Farghali, A., Bahgat, M., Allah, A. E. et Khedr, M. (2013). Adsorption of Pb (II) ions from aqueous solutions using copper oxide nanostructures. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 2(2), 61-71.
- Fiskesjö, G. (1985). The Allium test as a standard in environmental monitoring. *Hereditas*, 102(1), 99-112.
- Flora, S. J. et Pachauri, V. (2010). Chelation in metal intoxication. *International journal of environmental research and public health*, 7(7), 2745-2788.

- Furnival, E., Ellis, K. et Pickering, F. (1990). Evaluation of controlled release devices for administration of chromium sesquioxide using fistulated grazing sheep. 2. Variation in rate of release from the device. *Australian Journal of Agricultural Research*, 41(5), 977-986.
- Gao, J., Wang, H., Yuan, Q. et Feng, Y. (2018). Structure and function of the photosystem supercomplexes. *Frontiers in Plant Science*, 9, 357.
- García, A., Delgado, L., Torà, J. A., Casals, E., González, E., Puentes, V., Font, X., Carrera, J. et Sánchez, A. (2012). Effect of cerium dioxide, titanium dioxide, silver, and gold nanoparticles on the activity of microbial communities intended in wastewater treatment. *Journal of hazardous materials*, 199, 64-72.
- Ghani, A., Khan, I., Umer, S., Ahmed, I., Mustafa, I. et Mohammad, N. (2015). Response of wheat (*Triticum aestivum*) to exogenously applied chromium: effect on growth, chlorophyll and mineral composition. *J. Environ. Anal. Toxicol*, 5(3), 2161-0525.1000273.
- Ghosh, S., Prabhakar, R. et Samadder, S. (2019). Performance of γ -aluminium oxide nanoparticles for arsenic removal from groundwater. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 121-138.
- Golestanifar, H., Haibati, B., Amini, H., Dehghani, M. H. et Asadi, A. (2015). Removal of hexavalent chromium from aqueous solution by adsorption on γ -alumina nanoparticles. *Environment Protection Engineering*, 41(2), 133--145.
- Goswami, A., Raul, P. et Purkait, M. (2012). Arsenic adsorption using copper (II) oxide nanoparticles. *Chemical engineering research and design*, 90(9), 1387-1396.
- Guilizzoni, P., Adams, M. S. et MacGaffey, N. (1984). The effect of chromium on growth and photosynthesis of a submersed macrophyte, *Myriophyllum spicatum*. *Ecological Bulletins*, 90-96.
- Gülçin, I., Beydemir, Ş., Alici, H. A., Elmastaş, M. et Büyükkuroğlu, M. E. (2004). In vitro antioxidant properties of morphine. *Pharmacological Research*, 49(1), 59-66.
- Gulcin, I., Buyukokuroglu, M. E., Oktay, M. et Kufrevioglu, O. I. (2002). On the in vitro antioxidative properties of melatonin. *Journal of Pineal Research*, 33(3), 167-171.
- Gülçin, I., Kireççi, Ekrem, Akkemik, Ebru, Topal, Fevzi et Hisar, O. (2010). Antioxidant and antimicrobial activities of an aquatic plant: Duckweed (*Lemna minor* L.). *Turkish Journal of Biology*, 34(2), 175-188.
- Gülçin, İ., Mshvildadze, V., Gepdiremen, A. et Elias, R. (2006). The antioxidant activity of a triterpenoid glycoside isolated from the berries of *Hedera colchica*: 3-O-(β -d-glucopyranosyl)-hederagenin. *Phytotherapy Research: An International Journal*

Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives, 20(2), 130-134.

- Gülçin, İ., Oktay, M., Küfrevioğlu, Ö. İ. et Aslan, A. (2002). Determination of antioxidant activity of lichen *Cetraria islandica* (L) Ach. *Journal of ethnopharmacology*, 79(3), 325-329.
- Halliwell, B. et Gutteridge, J. M. (1985). *Free radicals in biology and medicine* : Pergamon.
- Hankamer, B., Barber, J. et Boekema, E. J. (1997). Structure and membrane organization of photosystem II in green plants. *Annual review of plant biology*, 48(1), 641-671.
- Hasar, H., Ipek, U., Obek, E. et Saatci, Y. (2000). Su mercimeginin (*Lemna minor* L.) ileri aritimda kullanimi. *SKKD*, 10, 9-13.
- Hassanpour, P., Panahi, Y., Ebrahimi-Kalan, A., Akbarzadeh, A., Davaran, S., Nasibova, A. N., Khalilov, R. et Kavetsky, T. (2018). Biomedical applications of aluminium oxide nanoparticles. *Micro & Nano Letters*, 13(9), 1227-1231.
- Holmes, A. L., Wise, S. et Wise, J. (2008). Carcinogenicity of hexavalent chromium. *Indian journal of medical research*, 128(4), 353-372.
- Höröcsik, Z., Kovács, L., Láposi, R., Mészáros, I., Lakatos, G. et Garab, G. (2007). Effect of chromium on photosystem 2 in the unicellular green alga, *Chlorella pyrenoidosa*. *Photosynthetica*, 45, 65-69.
- Hristovski, K., Baumgardner, A. et Westerhoff, P. (2007). Selecting metal oxide nanomaterials for arsenic removal in fixed bed columns: from nanopowders to aggregated nanoparticle media. *Journal of hazardous materials*, 147(1-2), 265-274.
- Hu, J., Zhang, Z., Zhang, C., Liu, S., Zhang, H., Li, D., Zhao, J., Han, Z., Liu, X. et Pan, J. (2018). Al₂O₃ nanoparticle impact on the toxic effect of Pb on the marine microalga *Isochrysis galbana*. *Ecotoxicology and environmental safety*, 161, 92-98.
- Huang, N., Yan, Y., Xu, Y., Jin, Y., Lei, J., Zou, X., Ran, D., Zhang, H., Luan, S. et Gu, H. (2013). Alumina nanoparticles alter rhythmic activities of local interneurons in the antennal lobe of *Drosophila*. *Nanotoxicology*, 7(2), 212-220.
- Huffman Jr, E. W. et Allaway, W. H. (1973). Chromium in plants. Distribution in tissues, organelles, and extracts and availability of bean leaf chromium to animals. *Journal of Agricultural and food chemistry*, 21(6), 982-986.
- Ito, T., Matsuda, Y., Jinba, T., Asai, N., Shimizu, T. et Shingubara, S. (2017). Fabrication and characterization of nano porous lattice biosensor using anodic aluminum oxide substrate. *Japanese Journal of Applied Physics*, 56(6S1), 06GG02.

- Janeeshma, E., Johnson, R., Amritha, M., Noble, L., Aswathi, K. R., Telesiński, A., Kalaji, H. M., Auriga, A. et Puthur, J. T. (2022). Modulations in chlorophyll a fluorescence based on intensity and spectral variations of light. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(10), 5599.
- Jiang, J., Oberdörster, G. et Biswas, P. (2009). Characterization of size, surface charge, and agglomeration state of nanoparticle dispersions for toxicological studies. *Journal of Nanoparticle Research*, 11, 77-89.
- Jobby, R., Jha, P., Yadav, A. K. et Desai, N. (2018). Biosorption and biotransformation of hexavalent chromium [Cr (VI)]: a comprehensive review. *Chemosphere*, 207, 255-266.
- Juhel, G., Batisse, E., Hugues, Q., Daly, D., van Pelt, F. N., O'Halloran, J. et Jansen, M. A. (2011). Alumina nanoparticles enhance growth of *Lemna minor*. *Aquatic toxicology*, 105(3-4), 328-336.
- Kakkalameli, S., Daphedar, A., Govindappa, M. et Taranath, T.). effect of chromium on morphological and biochemical responses on aquatic macrophyte *pistia stratiotes* L.(water lettuce).
- Karuppanapandian, T. et Kim, W. (2013). Cobalt-induced oxidative stress causes growth inhibition associated with enhanced lipid peroxidation and activates antioxidant responses in Indian mustard (*Brassica juncea* L.) leaves. *Acta physiologiae plantarum*, 35, 2429-2443.
- Khaleel, A., Kapoor, P. N. et Klabunde, K. J. (1999). Nanocrystalline metal oxides as new adsorbents for air purification. *Nanostructured Materials*, 11(4), 459-468.
- Khan, N., Bano, A. et Babar, M. A. (2019). Metabolic and physiological changes induced by plant growth regulators and plant growth promoting rhizobacteria and their impact on drought tolerance in *Cicer arietinum* L. *PloS one*, 14(3), e0213040.
- Khasim, D. I., Kumar, N. V. et Hussain, R. (1989). Environmental contamination of chromium in agricultural and animal products near a chromate industry. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology;(USA)*, 43(5).
- Khraisheh, M., AlMomani, F. et Al-Ghouti, M. (2021). Electrospun Al₂O₃ hydrophobic functionalized membranes for heavy metal recovery using direct contact membrane distillation. *International Journal of Energy Research*, 45(6), 8151-8167.
- Kirchhoff, H. (2019). Chloroplast ultrastructure in plants. *New Phytologist*, 223(2), 565-574.
- Koju, N. K., Song, X., Wang, Q., Hu, Z. et Colombo, C. (2018). Cadmium removal from simulated groundwater using alumina nanoparticles: behaviors and mechanisms. *Environmental Pollution*, 240, 255-266.

- Kornilovich, B. Y., Koval'chuk, I., Pshinko, G., Tsapyuk, E. et Krivoruchko, A. (2000). Water Treatment and Demineralization Technology-Water purification of uranium by the method of ultrafiltration. *Journal of Water chemistry and technology*, 22(1), 43-47.
- Kotaś, J. et Stasicka, Z. (2000). Chromium occurrence in the environment and methods of its speciation. *Environmental pollution*, 107(3), 263-283.
- Krayem, M., El Khatib, S., Hassan, Y., Deluchat, V. et Labrousse, P. (2021). In search for potential biomarkers of copper stress in aquatic plants. *Aquatic toxicology*, 239, 105952.
- Kumar, E., Bhatnagar, A., Kumar, U. et Sillanpää, M. (2011). Defluoridation from aqueous solutions by nano-alumina: characterization and sorption studies. *Journal of hazardous materials*, 186(2-3), 1042-1049.
- Küpper, H., Šetlík, I., Spiller, M., Küpper, F. C. et Prášil, O. (2002). Heavy metal-induced inhibition of photosynthesis: targets of in vivo heavy metal chlorophyll formation1. *Journal of Phycology*, 38(3), 429-441.
- Kushwaha, A., Hans, N., Kumar, S. et Rani, R. (2018). A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil-microbe-plant system and bioremediation strategies. *Ecotoxicology and environmental safety*, 147, 1035-1045.
- Latimer, P., Bannister, T. et Rabinowitch, E. (1956). Quantum yields of fluorescence of plant pigments. *Science*, 124(3222), 585-586.
- Lauwerys, R., Haufroid, V., Hoet, P. et Lison, D. (2007). Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles.
- Leonard, S. S., Harris, G. K. et Shi, X. (2004). Metal-induced oxidative stress and signal transduction. *Free Radical Biology and Medicine*, 37(12), 1921-1942.
- Lichtenthaler, H. K. (1987). [34] Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Dans *Methods in enzymology* (vol. 148, p. 350-382). Elsevier.
- Liu, X., Luo, L., Ding, Y. et Xu, Y. (2011). Amperometric biosensors based on alumina nanoparticles-chitosan-horseradish peroxidase nanobiocomposites for the determination of phenolic compounds. *Analyst*, 136(4), 696-701.
- Mahdavi, S., Jalali, M. et Afkhami, A. (2013). Heavy metals removal from aqueous solutions using TiO₂, MgO, and Al₂O₃ nanoparticles. *Chemical Engineering Communications*, 200(3), 448-470.
- Mahdavi, S., Jalali, M. et Afkhami, A. (2015). Heavy metals removal from aqueous solutions by Al₂O₃ nanoparticles modified with natural and chemical modifiers. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 85-102.

- Mathur, S., Agrawal, D. et Jajoo, A. (2014). Photosynthesis: response to high temperature stress. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 137, 116-126.
- Mathur, S., Kalaji, H. et Jajoo, A. (2016). Investigation of deleterious effects of chromium phytotoxicity and photosynthesis in wheat plant. *Photosynthetica*, 54(2), 185-192.
- Mauzerall, D. (1976). Chlorophyll and photosynthesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 273(924), 287-294.
- Mertz, W. (1993). Chromium in human nutrition: a review. *The Journal of nutrition*, 123(4), 626-633.
- Mohan, B. et Hosetti, B. (1999). Aquatic plants for toxicity assessment. *Environmental research*, 81(4), 259-274.
- Mouzaki-Paxinou, A.-C., Foudoulakis, M. et Arapis, G. (2016). The Use of the Biomarkers Chlorophylls and Carotenoids, for the Interpretation of the Effects in Lemna minor after Exposure of two Herbicides with Different Mode of Action.
- Murdock, R. C., Braydich-Stolle, L., Schrand, A. M., Schlager, J. J. et Hussain, S. M. (2008). Characterization of nanomaterial dispersion in solution prior to in vitro exposure using dynamic light scattering technique. *Toxicological sciences*, 101(2), 239-253.
- Nematshahi, N., Lahouti, M. et Ganjeali, A. (2012). Accumulation of chromium and its effect on growth of (*Allium cepa* cv. Hybrid). *European Journal of Experimental Biology*, 2(4), 969-974.
- Oktay, M., Gülçin, İ. et Küfrevioğlu, Ö. İ. (2003). Determination of in vitro antioxidant activity of fennel (*Foeniculum vulgare*) seed extracts. *LWT-Food Science and Technology*, 36(2), 263-271.
- Owji, H., Hemmati, S., Heidari, R. et Hakimzadeh, M. (2019). Effect of alumina (Al₂O₃) nanoparticles and macroparticles on *Trigonella foenum-graceum* L. in vitro cultures: Assessment of growth parameters and oxidative stress-related responses. *3 Biotech*, 9, 1-12.
- Ozengin, N. et Elmaci, A. (2007). Performance of Duckweed (*Lemna minor* L.) on different types of wastewater treatment. *Journal of Environmental Biology*, 28(2), 307-314.
- Pagels, F. et Guedes, A. C. (2023). β -Carotene from *Dunaliella*: Production, applications in food/feed, and recent advances. *Handbook of Food and Feed from Microalgae*, 203-219.
- Pagels, F., Vasconcelos, V. et Guedes, A. C. (2021). Carotenoids from cyanobacteria: Biotechnological potential and optimization strategies. *Biomolecules*, 11(5), 735.

- Pakrashi, S., Dalai, S., Humayun, A., Chakravarty, S., Chandrasekaran, N. et Mukherjee, A. (2013). Ceriodaphnia dubia as a potential bio-indicator for assessing acute aluminum oxide nanoparticle toxicity in fresh water environment. *PloS one*, 8(9), e74003.
- Palit, S., Sharma, A. et Talukder, G. (1994). Effects of cobalt on plants. *The Botanical Review*, 60, 149-181.
- Panda, S. K. (2007). Chromium-mediated oxidative stress and ultrastructural changes in root cells of developing rice seedlings. *Journal of plant physiology*, 164(11), 1419-1428.
- Papp, J. et Knoerr, A. (1985). Mineral facts and problems: bureau of mines bulletin 675. *UNT Digital Library. US Government Printing Office, Washington, DC*, 139-155.
- Pérez, M., Teixeira da Silva, J. et Lao, M. (2006). Light management in ornamental crops. *Floriculture Ornamental Plant Biotechnol*, 4, 683-695.
- Pessaraki, M. (2024). *Handbook of photosynthesis*. CRC press.
- Popovic, R., Dewez, D. et Juneau, P. (2003). Applications of chlorophyll fluorescence in ecotoxicology: heavy metals, herbicides, and air pollutants. Dans *Practical applications of chlorophyll fluorescence in plant biology* (p. 151-184). Springer.
- Poschenrieder, C., Gunsé, B. et Barceló, J. (1993). Chromium-induced inhibition of ethylene evolution in bean (*Phaseolus vulgaris*) leaves. *Physiologia plantarum*, 89(2), 404-408.
- Prabhakar, R. et Samadder, S. (2018). Low cost and easy synthesis of aluminium oxide nanoparticles for arsenite removal from groundwater: a complete batch study. *Journal of Molecular Liquids*, 250, 192-201.
- Pribil, M., Labs, M. et Leister, D. (2014). Structure and dynamics of thylakoids in land plants. *Journal of experimental botany*, 65(8), 1955-1972.
- Radha Jain, R. J., Srivastava, S. et Madan, V. (2000). Influence of chromium on growth and cell division of sugarcane.
- Radić, S., Stipaničev, D., Cvjetko, P., Rajčić, M. M., Širac, S., Pevalek-Kozlina, B. et Pavlica, M. (2011). Duckweed *Lemna minor* as a tool for testing toxicity and genotoxicity of surface waters. *Ecotoxicology and environmental safety*, 74(2), 182-187.
- Rahmani, A., Mousavi, H. Z. et Fazli, M. (2010). Effect of nanostructure alumina on adsorption of heavy metals. *Desalination*, 253(1-3), 94-100.
- Reale, L., Ferranti, F., Mantilacci, S., Corboli, M., Aversa, S., Landucci, F., Baldisserotto, C., Ferroni, L., Pancaldi, S. et Venanzoni, R. (2016). Cyto-histological and morpho-physiological responses of common duckweed (*Lemna minor* L.) to chromium. *Chemosphere*, 145, 98-105.

- Recillas, S., García, A., González, E., Casals, E., Puntos, V., Sánchez, A. et Font, X. (2011). Use of CeO₂, TiO₂ and Fe₃O₄ nanoparticles for the removal of lead from water: Toxicity of nanoparticles and derived compounds. *Desalination*, 277(1-3), 213-220.
- Riaz, M., Yasmeen, T., Arif, M. S., Ashraf, M. A., Hussain, Q., Shahzad, S. M., Rizwan, M., Mehmood, M. W., Zia, A. et Mian, I. A. (2019). Variations in morphological and physiological traits of wheat regulated by chromium species in long-term tannery effluent irrigated soils. *Chemosphere*, 222, 891-903.
- Richmond, A. (2004). *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology* (vol. 577). Wiley Online Library.
- Sadiq, I. M., Chowdhury, B., Chandrasekaran, N. et Mukherjee, A. (2009). Antimicrobial sensitivity of Escherichia coli to alumina nanoparticles. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 5(3), 282-286.
- Safwat, S. M., Mohamed, N. Y., Meshref, M. N. et Elawwad, A. (2022). Adsorption of phenol onto aluminum oxide nanoparticles: performance evaluation, mechanism exploration, and principal component analysis (PCA) of thermodynamics. *Adsorption Science & Technology*, 2022, 1924117.
- Sangor, F. I. et Al-Ghouti, M. A. (2023). Waste-to-value: Synthesis of nano-aluminum oxide (nano- γ -Al₂O₃) from waste aluminum foils for efficient adsorption of methylene blue dye. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100394.
- Shahid, M., Shamshad, S., Rafiq, M., Khalid, S., Bibi, I., Niazi, N. K., Dumat, C. et Rashid, M. I. (2017). Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. *Chemosphere*, 178, 513-533.
- Shanker, A. K., Cervantes, C., Loza-Tavera, H. et Avudainayagam, S. (2005). Chromium toxicity in plants. *Environment international*, 31(5), 739-753.
- Shanker, A. K., Djanaguiraman, M., Sudhagar, R., Chandrashekar, C. et Pathmanabhan, G. (2004). Differential antioxidative response of ascorbate glutathione pathway enzymes and metabolites to chromium speciation stress in green gram (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek. cv CO 4) roots. *Plant Science*, 166(4), 1035-1043.
- Sharma, Y., Srivastava, V. et Mukherjee, A. (2010). Synthesis and application of nano-Al₂O₃ powder for the reclamation of hexavalent chromium from aqueous solutions. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 55(7), 2390-2398.
- Shevela, D. et Bjorn, L. O. (2018). *Photosynthesis: solar energy for life*. World Scientific Publishing.
- Shewry, P. et Peterson, P. (1976). Distribution of chromium and nickel in plants and soil from serpentine and other sites. *The Journal of Ecology*, 195-212.

- Shinwari, K. I., Jan, M., Shah, G., Khattak, S. R., Urehman, S., Daud, M., Naeem, R. et Jamil, M. (2015). Seed priming with salicylic acid induces tolerance against chromium (VI) toxicity in rice (*Oryza sativa* L.). *Pak. J. Bot*, *47*, 161-170.
- Shokati Poursani, A., Nilchi, A., Hassani, A., Shariat, M. et Nouri, J. (2015). A novel method for synthesis of nano- γ -Al₂O₃: study of adsorption behavior of chromium, nickel, cadmium and lead ions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *12*, 2003-2014.
- Shupack, S. I. (1991). The chemistry of chromium and some resulting analytical problems. *Environmental Health Perspectives*, *92*, 7-11.
- Singh, V., Singh, N., Verma, M., Kamal, R., Tiwari, R., Sanjay Chivate, M., Rai, S. N., Kumar, A., Singh, A. et Singh, M. P. (2022). Hexavalent-chromium-induced oxidative stress and the protective role of antioxidants against cellular toxicity. *Antioxidants*, *11*(12), 2375.
- Song, J., Kong, H. et Jang, J. (2011). Adsorption of heavy metal ions from aqueous solution by polyrhodanine-encapsulated magnetic nanoparticles. *Journal of colloid and interface science*, *359*(2), 505-511.
- Soylak, M. et Erdogan, N. D. (2006). Copper (II)–rubeanic acid coprecipitation system for separation–preconcentration of trace metal ions in environmental samples for their flame atomic absorption spectrometric determinations. *Journal of hazardous materials*, *137*(2), 1035-1041.
- Srivastava, D., Tiwari, M., Dutta, P., Singh, P., Chawda, K., Kumari, M. et Chakrabarty, D. (2021). Chromium stress in plants: toxicity, tolerance and phytoremediation. *Sustainability*, *13*(9), 4629.
- Stern, R. M. (1982). *Chromium compounds: production and occupational exposure*. Elsevier.
- Stirbet, A., Lazár, D., Guo, Y. et Govindjee, G. (2020). Photosynthesis: basics, history and modelling. *Annals of botany*, *126*(4), 511-537.
- Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M., Qiang, S. et Goltsev, V. (2010). Simultaneous in vivo recording of prompt and delayed fluorescence and 820-nm reflection changes during drying and after rehydration of the resurrection plant *Haberlea rhodopensis*. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, *1797*(6-7), 1313-1326.
- Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M. et Srivastava, A. (2004). Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient. Dans *Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis* (p. 321-362). Springer.
- Subrahmanyam, D. (2008). Effects of chromium toxicity on leaf photosynthetic characteristics and oxidative changes in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Photosynthetica*, *46*(3), 339-345.

- Sundaramoorthy, P., Chidambaram, A., Ganesh, K. S., Unnikannan, P. et Baskaran, L. (2010). Chromium stress in paddy:(i) nutrient status of paddy under chromium stress;(ii) phytoremediation of chromium by aquatic and terrestrial weeds. *Comptes rendus biologiques*, 333(8), 597-607.
- Tarlani, A., Isari, M., Khazraei, A. et Eslami Moghadam, M. (2017). New sol-gel derived aluminum oxide-ibuprofen nanocomposite as a controlled releasing medication. *Nanomedicine research journal*, 2(1), 28-35.
- Thill, A., Zeyons, O., Spalla, O., Chauvat, F., Rose, J., Auffan, M. et Flank, A. M. (2006). Cytotoxicity of CeO₂ nanoparticles for Escherichia coli. Physico-chemical insight of the cytotoxicity mechanism. *Environmental Science & Technology*, 40(19), 6151-6156.
- Tiwari, K., Dwivedi, S., Singh, N., Rai, U. et Tripathi, R. (2009). Chromium (VI) induced phytotoxicity and oxidative stress in pea (*Pisum sativum* L.): biochemical changes and translocation of essential nutrients. *J Environ Biol*, 30(3), 389-394.
- Tkalec, M., Vidaković-Cifrek, Ž. et Regula, I. (1998). The effect of oil industry “high density brines” on duckweed *Lemna minor* L. *Chemosphere*, 37(13), 2703-2715.
- Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, S., Pandey, R., Singh, V. P., Sharma, N. C., Prasad, S. M., Dubey, N. K. et Chauhan, D. K. (2017). An overview on manufactured nanoparticles in plants: uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant physiology and biochemistry*, 110, 2-12.
- Tsimilli-Michael, M. et Strasser, R. J. (2008). In vivo assessment of stress impact on plant's vitality: applications in detecting and evaluating the beneficial role of mycorrhization on host plants. Dans *Mycorrhiza: state of the art, genetics and molecular biology, eco-function, biotechnology, eco-physiology, structure and systematics* (p. 679-703). Springer.
- Usman, K., Al Jabri, H., Abu-Dieyeh, M. H. et Alsafran, M. H. (2020). Comparative assessment of toxic metals bioaccumulation and the mechanisms of chromium (Cr) tolerance and uptake in *Calotropis procera*. *Frontiers in plant science*, 11, 883.
- Van Assche, F. et Clijsters, H. (1983). Multiple effects of heavy metal toxicity on photosynthesis. (p. 371-382). *Effects of Stress on Photosynthesis: Proceedings of a conference held at the 'Limburgs Universitair Centrum' Diepenbeek, Belgium, 22-27 August 1982*, Springer.
- Vernay, P., Gauthier-Moussard, C. et Hitmi, A. (2007). Interaction of bioaccumulation of heavy metal chromium with water relation, mineral nutrition and photosynthesis in developed leaves of *Lolium perenne* L. *Chemosphere*, 68(8), 1563-1575.
- Vinardell Martínez-Hidalgo, M. P., Sordé, A., Díaz Marcos, J., Baccarin, T. et Mitjans Arnal, M. (2015). Comparative effects of macro-sized aluminum oxide and aluminum oxide

nanoparticles on erythrocyte hemolysis: influence of cell source, temperature and size. *Journal Of Nanoparticle Research*, 2015, vol. 17, num. 2, p. 80.

- Wang, W. et Freemark, K. (1995). The use of plants for environmental monitoring and assessment. *Ecotoxicology and environmental safety*, 30(3), 289-301.
- Wang, X., Zhan, C., Kong, B., Zhu, X., Liu, J., Xu, W., Cai, W. et Wang, H. (2015). Self-curved coral-like γ -Al₂O₃ nanoplates for use as an adsorbent. *Journal of colloid and interface science*, 453, 244-251.
- Wang, Y., Kaur, G., Chen, Y., Santos, A., Losic, D. et Evdokiou, A. (2015). Bioinert anodic alumina nanotubes for targeting of endoplasmic reticulum stress and autophagic signaling: a combinatorial nanotube-based drug delivery system for enhancing cancer therapy. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(49), 27140-27151.
- Wei, Z., Chen, L., Thompson, D. M. et Montoya, L. D. (2014). Effect of particle size on in vitro cytotoxicity of titania and alumina nanoparticles. *Journal of Experimental Nanoscience*, 9(6), 625-638.
- Wen, J., Li, Z., Huang, B., Luo, N., Huang, M., Yang, R., Zhang, Q., Zhai, X. et Zeng, G. (2018). The complexation of rhizosphere and nonrhizosphere soil organic matter with chromium: Using elemental analysis combined with FTIR spectroscopy. *Ecotoxicology and environmental safety*, 154, 52-58.
- Whitmarsh, J. et Govindjee, G. (2002). Photosystem II. *eLS*.
- Wu, M., Xu, Y., Ding, W., Li, Y. et Xu, H. (2016). Mycoremediation of manganese and phenanthrene by *Pleurotus eryngii* mycelium enhanced by Tween 80 and saponin. *Applied microbiology and biotechnology*, 100, 7249-7261.
- Wu, X.-W., Ma, H.-W. et Zhang, Y.-R. (2010). Adsorption of chromium (VI) from aqueous solution by a mesoporous aluminosilicate synthesized from microcline. *Applied Clay Science*, 48(3), 538-541.
- Xu, Z.-R., Cai, M.-L., Chen, S.-H., Huang, X.-Y., Zhao, F.-J. et Wang, P. (2021). High-affinity sulfate transporter Sultr1; 2 is a major transporter for Cr (VI) uptake in plants. *Environmental Science & Technology*, 55(3), 1576-1584.
- Yu, X.-Z., Gu, J.-D. et Huang, S.-Z. (2007). Hexavalent chromium induced stress and metabolic responses in hybrid willows. *Ecotoxicology*, 16, 299-309.
- Zea, H. (2017). Evaluation of the Modified Reduction/Expansion Synthesis in the Production of Nanoparticulate Alumina.
- Zeng, F., Wu, X., Qiu, B., Wu, F., Jiang, L. et Zhang, G. (2014). Physiological and proteomic alterations in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings under hexavalent chromium stress. *Planta*, 240, 291-308.

- Zhang, L., Huang, T., Zhang, M., Guo, X. et Yuan, Z. (2008). Studies on the capability and behavior of adsorption of thallium on nano-Al₂O₃. *Journal of hazardous materials*, 157(2-3), 352-357.
- Zhang, X.-B., Liu, P., Li, D.-T., Xu, G.-D. et Jiang, M.-J. (2008). FTIR spectroscopic characterization of chromium-induced changes in root cell wall of plants. *Guang pu xue yu guang pu fen xi= Guang pu*, 28(5), 1067-1070.
- Zhou, S., Antonietti, M. et Niederberger, M. (2007). Low-temperature synthesis of γ -alumina nanocrystals from aluminum acetylacetonate in nonaqueous media. *Small*, 3(5), 763-767.
- Zou, J., Wang, M., Jiang, W. et Liu, D. (2006). Effects of hexavalent chromium (VI) on root growth and cell division in root tip cells of *Amaranthus viridis* L. *Pakistan Journal of Botany*, 38(3), 673.