

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Bejaia

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Biologiques et de l'Environnement
Spécialité : Biodiversité et Sécurité Alimentaire



Réf :.....

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

**Etude de l'effet du zinc (Zn) et du chrome (Cr)
sur la germination des graines de la lavande
papillon (*Lavandula stoechas* L.)**

Présenté par :

Dahia Narimane & Aroul Hanane

Soutenu le : **14 Juillet 2022**

Devant le jury composé de :

Mr	<i>Bouadam S.</i>	MAA	Président
Mr	<i>Benadjaoud A.</i>	MCB	Encadreur
Mme	<i>Benhamiche-Hanifi S.</i>	MCA	Examinatrice

Année universitaire : 2021 / 2022

Remerciements

*Tout d'abord, nous tenons à exprimer nos remerciements au **Bon Dieu** de nous avoir donné le courage et la force d'achever notre travail et pour sa bienveillance.*

*Notre profonde gratitude va à notre promoteur **Mr Benadjaoud Ali** pour la qualité de son encadrement, sa constante disponibilité, ses conseils, ses compétences scientifiques, qui nous ont permis d'élargir nos connaissances.*

*Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à : **Mr Bouadam S** pour nous avoir fait l'honneur de présider ce jury et à **Mme Benhamiche-Hanifi S** pour avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Nos remerciements s'adressent à l'ensemble du personnel technique des laboratoires pédagogiques de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, on remercie également **Mr Dadache Mohammed, BENMOUHOU B Hassina** pour leurs aides et leurs soutiens.*

Tout comme nous exprimons les mêmes sentiments de gratitude à tous les enseignants qui nous ont comptés parmi leurs étudiants tout au long de notre parcours universitaire.

Dédicace

Je rends grâce à Dieu le tout puissant qui m'a permis de mener à bien ce projet de fin d'études.

Je dédie ce travail, fruit de mon long chemin d'étude :

À la mémoire de ma grand-mère Houria qui a été toujours dans mon esprit et dans mon cœur, Tu nous as quittées, sans nous avertir. Tu as laissé derrière toi un grand vide que rien au monde ne peut combler. Mais les souvenirs restent à jamais gravés dans ma mémoire. Je te dédie aujourd'hui ma réussite. Que dieu, le miséricordieux, t'accueille dans son éternel paradis

À ma mère, qui a éclairé mon chemin et qui m'a encouragé et soutenu tout au long de mes études.

À mon père qui m'a inculqué une bonne éducation, le chemin de la dignité et la voie de la sagesse.

À mes adorables frères que Dieu les Protège : Khaled, Lamine

À mes Sœurs chéries : Aicha, Fairouz et Khadidja. Je leur souhaite la réussite dans leurs vie privée.

À mes amis et à mes collègues pour leur soutien durant les moments difficiles de mon travail : Hayette, Hocine, Imène, Mélissa, Halim, Aya, Yasmin, Ishak, Mahdjouba et Katia

À ma binôme Narimane pour son aide et pour sa compréhension a réalisé se modeste travail

À toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Hanane

Dédicace

Je rends grâce à Dieu le tout puissant qui m'a permis de mener à bien ce projet de fin d'études

Je dédie ce modeste travail qui est le fruit de tant d'années d'étude : à toutes les personnes proches de mon cœur.

À mes chers parents

Tous mes sentiments de respect, d'amour, de gratitude et de reconnaissance pour tous les sacrifices énormément déployés pour m'élever dignement et assurer mon éducation dans les meilleures conditions Je serai reconnaissante toute ma vie, qu'Allah vous accorde longue vie dans la santé

À mes chers frères Lyes, Khireddine, Rafik je vous remercie pour leur soutien de long de mes études et leur encouragement

À mes adorables sœurs Aziza, Nadjette, Hayette, Lamia qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'étude

À ma Chère amie de la vie Wissam nous avons partagé les meilleurs et les plus agréables moments je te souhaite tout le bonheur du monde

À ma binôme Hanane pour son encouragement et sa patience et compréhension

À mes belle collègue Katia et Mehdjoubba pour leurs soutiens

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, mes amies et mes collègues

Narimane

%	Pourcentage
°	Degré
°C	Degré Celsius
±	Plus ou moins
[]	Concentration
λ	Longueur d'onde
Cr	Chrome
Fig.	Figure
h	Heure
KCl	Chlorure de potassium
K₂Cr₂O₇	Dichromate de potassium
L.	<i>Lavandula</i>
L.	Linné
mn	Minute
NaCl	Chlorure de sodium
Na₂SO₄	Sulfate de sodium
PEG₆₀₀₀	Polyéthylène glycol de masse molaire de 6000 g/mol
PF	Poids frais
ppm	Parties par Million
PS	Poids sec
Tab.	Tableau
UICPA	Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée
vs	Versus
Zn	Zinc
ZnSO₄.7H₂O	Sulfate de zinc heptahydraté

I. Introduction	01
II. Synthèse Bibliographique	03
II.1. Généralités sur les lavandes / <i>Lavandula stoechas</i> L.	03
II.1.1. Les lavandes	03
II.1.2. <i>Lavandula stoechas</i> L.	03
II.1.2.1. Attributs qualificatifs de <i>Lavandula stoechas</i> L.	03
II.1.2.2. Répartition géographique de <i>Lavandula stoechas</i> L.	03
II.1.2.3. Description botanique de <i>Lavandula stoechas</i> L.	04
II.1.2.4. Ecologie de <i>Lavandula stoechas</i> L.	04
II.1.2.5. Intérêt et bénéfices de <i>Lavandula stoechas</i> L.	05
II.2. Généralités sur la germination	07
II.2.1. Définition	07
II.2.2. Phases de la germination	07
II.2.3. Critères de la germination	09
II.2.4. Inaptitudes à la germination	10
II.3. Généralités sur les métaux lourds	11
II.3.1. Définition	11
II.3.2. Caractéristiques des métaux lourds	11
II.3.2.1. Propriétés physico-chimiques	11
II.3.2.2. Importance physiologique	12
II.3.2.3. Incidences sur l'environnement	12
II.3.2.4. Répercussions sur les chaînes alimentaires	12
II.4. Eléments zinc / chrome	13
II.4.1. Zinc	13
II.4.1.1. Propriétés du zinc	13
II.4.1.2. Effets du zinc sur la santé	14
II.4.1.3. Impacts du zinc sur l'environnement	14
II.4.2. Chrome	15
II.4.2.1. Propriétés du chrome	15
II.4.2.2. Effets du chrome sur la santé	15
II.4.2.3. Impacts du chrome sur l'environnement	16

II.5. Ajustement osmotique par accumulation de la proline	16
II.5.1. Ajustement osmotique	16
II.5.2. Accumulation de la proline	16
II.5.2.1. Biosynthèse de la proline	17
II.5.2.2. Catabolisme de la proline	18
II.5.3. Autres rôles de la proline	19
III. Matériel & Méthodes	20
III.1. Matériel	20
III.1.1. Matériel végétal	20
III.1.1.1. Origine des graines	20
III.1.1.2. Désinfection des graines	20
III.1.1.3. Germination des graines	20
III.1.1.4. Plantules obtenues	21
III.1.2. Préparation des solutions métalliques	21
III.1.2.1. Solution de ZnSO₄	21
III.1.2.2. Solution de K₂Cr₂O₇	22
III.2. Méthodes	22
III.2.1. Méthodes appliquées à la germination	22
III.2.1.1. Pourcentages cumulés de germination	22
III.2.1.2. Pourcentages finaux de germination	23
III.2.1.3. Temps moyens de germination	23
III.2.2. Statut de l'eau	23
III.2.2.1. Poids frais	23
III.2.2.2. Poids sec	23
III.2.2.3. Teneur en eau	23
III.2.3. Mesures biométriques	24
III.2.3.1. Parties racinaires	24
III.2.3.2. Parties aériennes	24
III.2.4. Extraction et dosage de la proline	24
III.2.4.1. Extraction	24
III.2.4.2. Dosage	24
III.2.4.3. Courbe étalon	25
III.2.5. Etude statistique	25

IV. Résultats & Discussion	26
IV.1. Résultats	26
IV.1.1. Résultats relatifs à la germination	26
IV.1.1.1. Pourcentages cumulés de germination des graines traitées au ZnSO₄	26
IV.1.1.2. Pourcentages finaux de germination des graines traitées au ZnSO₄	27
IV.1.1.3. Temps moyens de germination des graines traitées au ZnSO₄	28
IV.1.1.4. Pourcentages cumulés de germination des graines traitées au K₂Cr₂O₇	28
IV.1.1.5. Pourcentages finaux de germination des graines traitées au K₂Cr₂O₇	30
IV.1.1.6. Temps moyens de germination des graines traitées au K₂Cr₂O₇	30
IV.1.1.7. Comparatif entre lots de graines traitées au ZnSO₄ / K₂Cr₂O₇	31
IV.1.2. Résultats relatifs au statut de l'eau des plantules	34
IV.1.2.1. Poids frais des lots de plantules résultants des divers traitements	34
IV.1.2.2. Poids secs des lots de plantules résultants des divers traitements	35
IV.1.2.3. Teneur en eau des lots de plantules résultants des divers traitements	36
IV.1.2.4. Comparatif entre les lots de plantules résultants des divers traitements	37
IV.1.3. Résultats relatifs aux mesures biométriques	39
IV.1.3.1. Partie racinaire des lots de plantules résultants des divers traitements	39
IV.1.3.2. Partie aérienne des lots de plantules résultants des divers traitements	40
IV.1.3.3. Comparatif entre les lots de plantules résultants des divers traitements	41
IV.1.4. Résultats relatifs à la quantification de la proline	43
IV.1.4.1. Proline I des lots de plantules résultants des divers traitements	43
IV.1.4.2. Proline II des lots de plantules résultants des divers traitements	44
IV.1.4.3. Comparatif entre les lots de plantules résultants des divers traitements	45
IV.2. Discussion	47
IV.2.1. Discussion relative à la germination	47
IV.2.2. Discussion relative au statut de l'eau	49
IV.2.3. Discussion relative aux mesures biométriques	51
IV.2.4. Discussion relative à la quantification de la proline	52
V. Conclusion	53
VI. Références bibliographiques	55

N°	Titre	Page
1	Caractéristiques et propriétés physico-chimiques de l'élément chimique zinc.	13
2	Caractéristiques et propriétés physico-chimiques de l'élément chimique chrome.	15
3	Evolution des pourcentages finaux de germination des graines de <i>Lavandula stoechas</i> L. sous les effets des différentes concentrations en ZnSO ₄ ou en K ₂ Cr ₂ O ₇ .	32
4	Evolution des temps moyens de germination des graines de <i>Lavandula stoechas</i> L. sous les effets des différentes concentrations en ZnSO ₄ ou en K ₂ Cr ₂ O ₇ .	33
5	Poids frais mesurés des plantules de <i>Lavandula stoechas</i> L. issues des traitements appliqués aux graines par les différentes concentrations en ZnSO ₄ / K ₂ Cr ₂ O ₇ .	37
6	Poids secs mesurés des plantules de <i>Lavandula stoechas</i> L. issues des traitements appliqués aux graines par les différentes concentrations en ZnSO ₄ / K ₂ Cr ₂ O ₇ .	38
7	Teneur en eau des plantules de <i>Lavandula stoechas</i> L. issues des traitements appliqués aux graines par les différentes concentrations en ZnSO ₄ / K ₂ Cr ₂ O ₇ .	39
8	Longueur de la partie racinaire des plantules de <i>Lavandula stoechas</i> L. issues des traitements appliqués aux graines par les différentes concentrations en ZnSO ₄ / K ₂ Cr ₂ O ₇ .	42
9	Longueur de la partie aérienne des plantules de <i>Lavandula stoechas</i> L. issues des traitements appliqués aux graines par les différentes concentrations en ZnSO ₄ / K ₂ Cr ₂ O ₇ .	42
10	Quantité en proline (exprimée en mg/g de poids frais) des plantules de <i>Lavandula stoechas</i> L. issues des traitements appliqués aux graines par les différentes concentrations en ZnSO ₄ / K ₂ Cr ₂ O ₇ .	45
11	Quantité en proline (exprimée en mg/100 mg de poids sec) des plantules de <i>Lavandula stoechas</i> L. issues des traitements appliqués aux graines par les différentes concentrations en ZnSO ₄ / K ₂ Cr ₂ O ₇ .	46

N°	Titre	Page
01	Distribution géographique des deux sous-espèces de <i>Lavandula stoechas</i> L. (sous-espèces <i>stoechas</i> et <i>luisieri</i>) d'après Upson & Andrews (2004) <i>In</i> Benabdelkader (2012) .	04
02	Feuilles et fleurs en épis de <i>Lavandula stoechas</i> L. (https://www.alamyimages.fr/photo-image-lavandula-stoechas-la-lavande-a-isolated-on-white-177327318.html).	05
03	Structure de quelques principes actifs de l'huile essentielle de <i>Lavandula stoechas</i> L. (Boukhatem et al. 2020).	06
04	Origine des différentes parties constitutives des graines et des fruits (Côme & Corbineau, 1998 . www.semanticscholar.org/paper/Composition).	07
05	Principaux événements liés aux trois phases successives de la germination des graines (Côme, 1970 ; Bewley, 1997).	08
06	Divers types théoriques de courbes de germination. Courbes 1 et 2 correspondent aux graines viables germant respectivement de façon homogène ou étalée dans le temps ; courbes 3 et 4 correspondant aux graines ne germant pas toutes, et respectivement le taux maximal est atteint rapidement ou plus lentement (Côme & Corbineau, 1998, 2006).	09
07	Régulation de la germination par les facteurs de l'environnement et les inaptitudes à la germination résultant de processus de dormances (Corbineau, 2020).	10
08	Classification périodique des éléments (Fourest, 1993).	11
09	Stocks et flux des éléments traces (Robert et Juste, 1997).	12
10	Phytodisponibilité des éléments traces dans les sols (Morel, 1996).	13
11	Représentation de la structure des 2 formes énantiomères de la proline L et D correspondant à l'acide pyrrolidine-2-carboxylique (Patriarca et al. 2021).	17
12	Voies de biosynthèse de la proline via le glutamate ou l'ornithine (Meena et al. 2019).	18
13	Catabolisme de la proline (Trovato et al. 2008).	18

- 14** Multiples rôles joués par la proline lors d'un stress ([Abbas et al. 2018](#)). **19**
- 15** Désinfection de surface des graines de *Lavandula stoechas* L. par de l'eau de javel à 5% et étalement pour séchage avant une utilisation pour la germination. **20**
- 16** Graines de *Lavandula stoechas* L. en phase de germination. Respectivement de gauche à droite : lot de graines témoins, lot de graines traitées au zinc et lot de graines traitées au chrome. **21**
- 17** Présentation des cristaux de sulfate de zinc heptahydraté (<http://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/1758754>) et ses quelques caractéristiques physico-chimiques. **21**
- 18** Apparence générale des cristaux de dichromate de potassium (http://en-wikipedia.org/wiki/Potassium_dichromate) et ses quelques caractéristiques physico-chimiques. **22**
- 19** Courbe étalon de la proline réalisée à l'aide d'une solution mère de proline de 1 mM (densité optique lue à $\lambda = 515$ nm). **25**
- 20** Evolution des pourcentages cumulés moyens de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. témoins [0 ppm] et traitées par différentes concentrations en $ZnSO_4$ [100 ; 200 ; 300 et 400 ppm] en fonction du temps. **26**
- 21** Effets des différentes concentrations en $ZnSO_4$ [100 ; 200 ; 300 et 400 ppm] sur les pourcentages finaux de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. comparativement aux graines témoins [0 ppm]. **27**
- 22** Effets des différentes concentrations en $ZnSO_4$ [100 ; 200 ; 300 et 400 ppm] sur les temps moyens de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. comparativement au temps moyen de germination mis par les graines témoins [0 ppm]. **28**
- 23** Evolution des pourcentages cumulés moyens de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. témoins [0 ppm] et traitées par différentes concentrations en $K_2Cr_2O_7$ [100 ; 200 ; 300 et 400 ppm] en fonction du temps. **29**
- 24** Effets des différentes concentrations en $K_2Cr_2O_7$ [100 ; 200 ; 300 et 400 ppm] sur les pourcentages finaux de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. comparativement aux graines témoins [0 ppm]. **30**

- 25** Effets des différentes concentrations en $K_2Cr_2O_7$ [100 ; 200 ; 300 et 400 ppm] sur les temps moyens de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. comparativement au temps moyen de germination mis par les graines témoins [0 ppm]. **31**
- 26** Evolution des poids frais moyens par jeune plantule de *Lavandula stoechas* L. en fonction des différentes concentrations en $ZnSO_4$ et en $K_2Cr_2O_7$ appliquées lors de la germination des graines. Les différentes lettres indiquent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$. **34**
- 27** Evolution des poids secs moyens par jeune plantule de *Lavandula stoechas* L. en fonction des différentes concentrations en $ZnSO_4$ et en $K_2Cr_2O_7$ appliquées lors de la germination des graines. Les différentes lettres indiquent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$. **35**
- 28** Evolution des teneurs en eau moyennes par jeune plantule de *Lavandula stoechas* L. en fonction des différentes concentrations en $ZnSO_4$ et en $K_2Cr_2O_7$ appliquées lors de la germination des graines. Les différentes lettres indiquent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$. **36**
- 29** Evolution des longueurs moyennes des racines par jeune plantule de *Lavandula stoechas* L. en fonction des différentes concentrations en $ZnSO_4$ et en $K_2Cr_2O_7$ appliquées lors de la germination des graines. Les différentes lettres indiquent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$. **40**
- 30** Evolution des longueurs moyennes des parties aériennes par jeune plantule de *Lavandula stoechas* L. en fonction des différentes concentrations en $ZnSO_4$ et en $K_2Cr_2O_7$ appliquées lors de la germination des graines. Les différentes lettres indiquent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$. **41**
- 31** Evolution des quantités en proline (exprimées en mg/g de poids frais) par jeune plantule de *Lavandula stoechas* L. en fonction des différentes concentrations en $ZnSO_4$ et en $K_2Cr_2O_7$ appliquées lors de la germination des graines. Les différentes lettres indiquent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$. **43**
- 32** Evolution des quantités en proline (exprimées en mg/100 mg de poids sec) par jeune plantule de *Lavandula stoechas* L. en fonction des différentes concentrations en $ZnSO_4$ et en $K_2Cr_2O_7$ appliquées lors de la germination des graines. Les différentes lettres indiquent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$. **44**

INTRODUCTION

I. Introduction

Notre région de Bejaia se caractérise par une richesse floristique et diversifiée. Sa situation, son sol et son climat renforce cette diversité et permet le développement d'espèces, pouvant pousser spontanément. C'est le cas de la lavande papillon, *Lavandula stoechas* L.

Cette plante est connue et reconnue pour ses nombreux atouts, notamment dans l'aromathérapie. Ses usages comme plante dépurative, dans la détoxification et dans la composition de certaines thériacales donnent des résultats probants. Son huile essentielle est la plus appropriée des lavandes pour ses vertus expectorantes et mucolytiques lors notamment d'encombrements bronchiques (**Boukhatem et al. 2020**).

Considérant ses nombreuses vertus et usages, il est important d'entrevoir son exploitation, pour ce faire des études doivent être entreprises du côté de son écologie et de sa physiologie. C'est ce qui a été déjà entrepris avec les possibilités de l'amélioration de son pouvoir germinatif après un amorçage préalable au KCl utilisé à différentes concentrations. Les résultats obtenus avec cet amorçage préalable, améliore sensiblement la capacité germinative des graines de cette espèce (**Ouhimi & Rahab, 2021 ; Saadi & Zeggane, 2021**).

Ces deux derniers travaux se sont ensuite intéressés aux possibilités de germination des graines de cette espèce en présence d'une contrainte : saline imposée par différentes concentrations en NaCl (**Ouhimi & Rahab, 2021**) ; hydrique et/ou osmotique imposée par différentes concentrations en PEG₆₀₀₀ (**Saadi & Zeggane, 2021**). Les résultats obtenus sont fonction de la nature de l'agent traitant et de la concentration usitée.

Dans notre cas d'étude, on s'est projeté sur les possibilités de phytoremediation que pourrait exprimer cette espèce en face d'une autre contrainte imposée cette fois-ci par l'utilisation de métaux lourds. Pour ce faire, deux éléments métalliques aux caractéristiques différentes, le zinc ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) et le chrome ($K_2Cr_2O_7$), ont été apportés sous différentes concentrations [100, 200, 300 et 400 ppm] aux graines de *L. stoechas* L.

L'évolution au cours du temps des pourcentages de germination cumulés, du pouvoir germinatif obtenu au final du suivi de la germination, ainsi que des temps moyens de germination ont été considérés en présence de concentrations croissantes de ces métaux, Zn et Cr.

Les plantules qui en sont issues au bout du suivi de cette germination (20 jours) ont été récupérées et analysées par rapport : *(a)* au statut de l'eau en déterminant leur poids frais, leur poids sec et leur teneur en eau ; *(b)* aux mesures des longueurs de leurs parties racinaires et aériennes considérées séparément et *(c)* à la détermination de leur quantité en proline, un acide aminé qui tend à s'accumuler en situation de stress.

***SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE***

II.1. Généralités sur les lavandes / *Lavandula stoechas* L.

II.1.1. Les lavandes

Le genre *Lavandula* de la famille des *Lamiaceae* compte 39 espèces réparties en 3 sous-genres : *Lavandula*, *Fabricia* et *Sabaudia*. Le sous-genre *Lavandula* est représenté par 3 sections : *Stoechas*, *Lavandula* et *Dentata*, qui se distinguent par une inflorescence très caractéristique (Upson and Andrews, 2004 ; Moya et al. 2016).

La section *Lavandula* regroupe des petites plantes ligneuses, possédant des feuilles linéaires à lancéolées. On en distingue notamment 2 espèces parmi cette section : la lavande fine (*Lavandula angustifolia* Miller) et le lavandin (*Lavandula x intermedia*). La lavande fine est très connue pour son parfum et les propriétés médicinales de son huile essentielle ; le lavandin est par contre issu d'une hybridation naturelle entre *L. angustifolia* et *L. latifolia*. Le lavandin est très largement cultivé et sa fleur est plus productive en huile essentielle (Lis-Balchin, 2002 ; Upson and Andrews, 2004).

Les taxons de la section *Stoechas* regroupent de petits arbustes aromatiques ligneux, arborant des feuilles linéaires lancéolées et de longues bractées au sommet de l'inflorescence. Cette section est composée de 3 espèces qu'on confond souvent à cause de leurs caractéristiques morphologiques étroitement liées : *L. stoechas*, *L. pedunculata* et *L. viridis* (Upson and Andrews, 2004).

II.1.2. *Lavandula stoechas* L.

II.1.2.1. Attributs qualificatifs de *Lavandula stoechas* L.

Lavandula stoechas L. (syn. *Stoechas officinarium* Moench) est connue sous les dénominations lavande des stoechades, lavande maritime ou lavande papillon (*Amezir* en Kabyle ; *Halhal* en Arabe). Le nom *stoechas* fait référence à *stoechades*, appellation des îles d'Hyères, situées au sud-est de la France (Davis, 2020).

II.1.2.2. Répartition géographique de *Lavandula stoechas* L.

Le territoire géographique occupé par *L. stoechas* L. est le plus vaste. Elle est largement répandue dans tout le bassin méditerranéen (Europe méridionale, Afrique du Nord et Moyen Orient), avec une petite disjonction au niveau de la frontière Libye – Egypte (Fig. 1) (Davis, 2020).

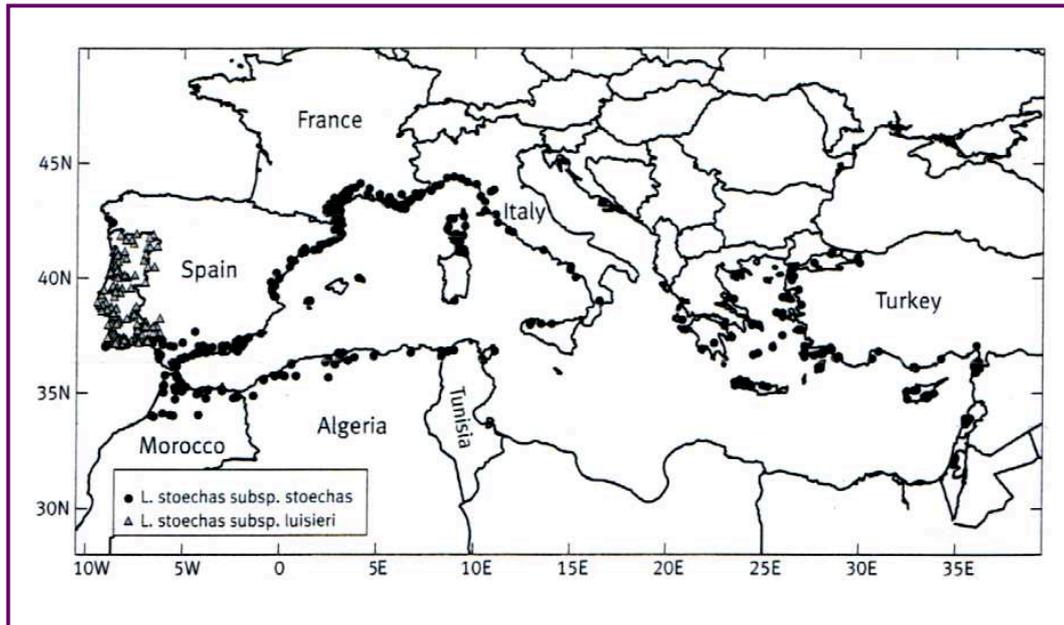


Figure 1 : Distribution géographique des deux sous-espèces de *Lavandula stoechas* L. (sous-espèces *stoechas* et *luisieri*) d'après **Upson & Andrews (2004)** In **Benabdelkader (2012)**.

II.1.2.3. Description botanique de *Lavandula stoechas* L.

Lavandula stoechas L. est un sous-arbrisseau de 30-60 cm, tomenteux et à rameaux peu allongés. Les feuilles opposées de 2-4 cm de long sont sessiles, tomenteuses, oblongues, lancéolées, linéaires, étroites et recourbées sur les bords et sont souvent d'une couleur gris-vert. Ses fleurs se présentent sous forme d'épis de 2 à 3 cm, surmontés de bractées violettes à pourpres de 4 à 8 mm. Le calice est composé de 5 sépales verts et pourpres soudés à la base, tandis que la corolle forme un tube violet clair. Les fruits sont des akènes contenant chacun une graine. Ces akènes sont groupés par 4 au fond du calice sec (**Fig. 2**) (**Coste, <http://www.telabotanica.org/bdtfx-nn-75211>**).

II.1.2.4. Ecologie de *Lavandula stoechas* L.

Lavandula stoechas L. a besoin de sécheresse, de chaleur et de la lumière pour bien se développer. Elle supporte la mi-ombre et tolère le froid jusqu'à -5°C. Elle pousse sur les coteaux arides, maquis, garrigues et bois ouverts. Elle ne supporte que les basses altitudes, pousse sur les sols siliceux et ne tolère pas les sols alcalins (**Julve, <http://www.telabotanica.org/eflore>**).



Figure 2 : Feuilles et fleurs en épis de *Lavandula stoechas* L. (<https://www.alamyimages.fr/photo-image-lavandula-stoechas-la-lavande-a-isolated-on-white-177327318.html>).

II.1.2.5. Intérêts et bénéfices de *Lavandula stoechas* L.

Lavandula stoechas L. est tout d'abord une plante ornementale. Elle est souvent utilisée en avant des massifs d'arbustes, en rocailles, en association dans les plates-bandes de plantes vivaces, sur les balcons et terrasses (Akbar, 2020).

Dans le passé, elle a été utilisée pour l'embaument, pour parfumer les bains et pour l'entretien du linge. Elle fût la première lavande utilisée en parfumerie, cependant son huile essentielle est aujourd'hui délaissée en raison de son odeur fortement camphrée (Akbar, 2020 ; Boukhatem et al. 2020).

C'est aussi une plante mellifère. Son miel est un miel de dégustation, ambré, devenant clair en se solidifiant, assez savoureux et légèrement boisé (Guyot-Declerck et al. 2002). En cuisine, ses parties aériennes sont utilisées comme herbe culinaire (Benabdelkader, 2012) et joue un rôle actif dans la conservation des denrées alimentaires, présentant une activité inhibitrice sur la croissance fongique grâce à son huile essentielle (Amara et al. 2018).

Cette huile essentielle est d'ailleurs concentrée en fenchone (25 à 42 %), camphre (12 à 28 %), 1,8-cinéole (10 à 16 %) et linalol (2 à 14 %) (Fig. 3) (Akbar, 2020 ; Boukhatem et al. 2020).

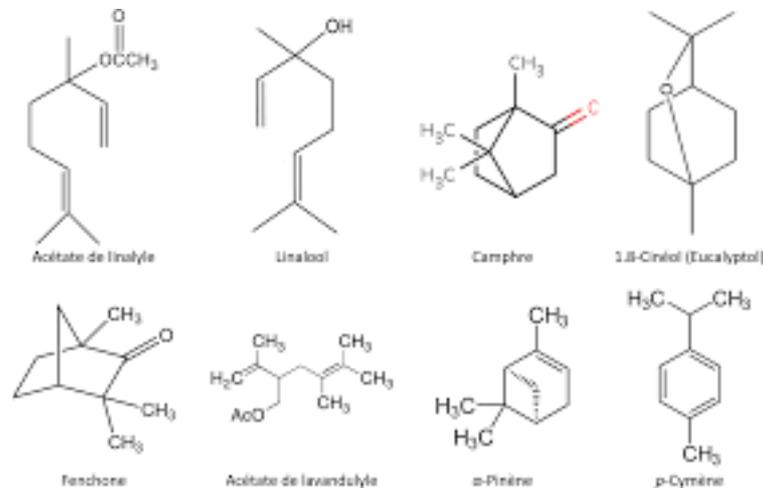


Figure 3 : Structure de quelques principes actifs de l'huile essentielle de *Lavandula stoechas* L. (Boukhatem et al. 2020).

Les différentes molécules de *L. stoechas* L. lui confèrent de nombreuses indications en aromathérapie, très utilisée comme (Akbar, 2020 ; Boukhatem et al. 2020) :

- **Expectorant** : les cétones et époxydes terpéniques aident à l'expulsion du mucus de la trachée ou des bronches, ce qui libère les voies respiratoires ;
- **Mucolytique** : les cétones et époxydes terpéniques fluidifient le mucus, assurant conjointement à l'action expectorante de libérer les voies respiratoires ;
- **Anticatarrhal** : l'huile essentielle stimule les écoulements du mucus des voies respiratoires ;
- **Antibactérien** : le 1,8-cinéole (eucalyptol) et le linalol aident à lutter contre les bactéries ;
- **Anti-inflammatoire** : le linalol et le 1,8-cinéole modulent la réponse de l'organisme vis-à-vis d'une inflammation et calment les sensations de chaleur et les rougeurs qui en découlent ;
- **Cicatrisant** : la fenchone et le camphre (bornéone) aident à la cicatrisation des plaies et la reconstitution des peaux après blessure.

II.2. Généralités sur la germination

II.2.1. Définition

La propagation d'une espèce se réalise grâce à la graine ou la semence, issue de la transformation de l'ovule après la fécondation (**Fig. 4**). A un stade précoce de son développement, l'embryon se déshydrate et rentre dans un état de vie ralentie. Le processus de germination correspond à l'étape par laquelle une semence en vie ralentie, se réveille et donne naissance à une plantule. **Evenari (1957)** définit la germination comme étant un processus dont les limites sont le début de l'hydratation de la semence et le tout début de la croissance de la racicule.

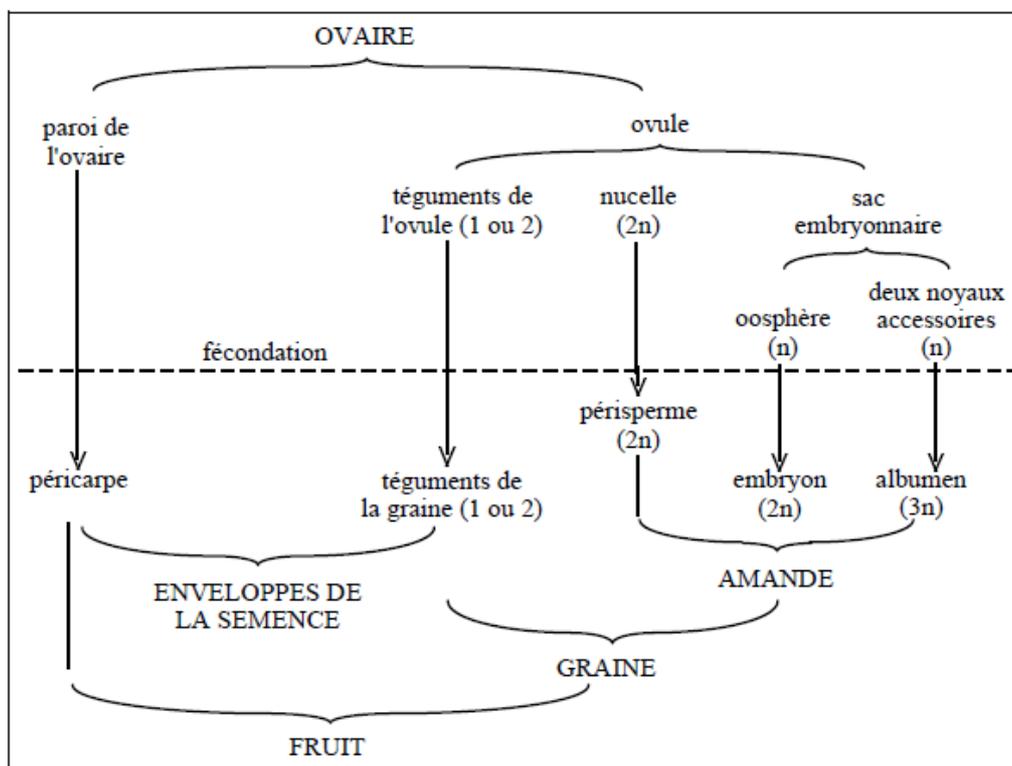


Figure 4 : Origine des différentes parties constitutives des graines et des fruits (**Côme & Corbineau, 1998** ; www.semanticscholar.org/paper/Composition).

II.2.2. Phases de la germination

En mesurant l'état de l'imbibition et les activités respiratoires des graines en cours de germination, il a été trouvé que ce processus s'effectuait en trois phases successives : les phases d'imbibition, de germination *stricto sensu* et de croissance (**Fig. 5**).

La première phase ou phase d'imbibition est un phénomène d'entrée rapide et passive d'eau. Cette entrée est accompagnée d'une élévation de la consommation d'O₂ attribuée à l'activation des enzymes mitochondriales qui vont fournir de l'ATP. L'intensité respiratoire s'accroît au cours de ces premières heures de l'imbibition et s'accompagne parfois d'un dégagement de chaleur (Côme, 1982 ; Anzala, 2006).

La seconde phase est aussi importante que la première phase, car c'est le siège des activités hydrolytiques et conditionne la croissance ultérieure. C'est aussi la phase dont il est difficile de connaître son moment d'arrêt, c'est pourquoi la percée des enveloppes par la radicule est couramment utilisée pour déterminer que la graine a définitivement germé (Côme, 1982). On considère aussi qu'une graine a germé lorsque la taille de sa radicule fait au moins 1 mm de long (Jordan and Haferkamp, 1989).

La phase de croissance post-germinative marque la reprise de l'absorption d'eau et correspond à un processus de croissance de la radicule puis de la partie aérienne (Hopkins, 2003).

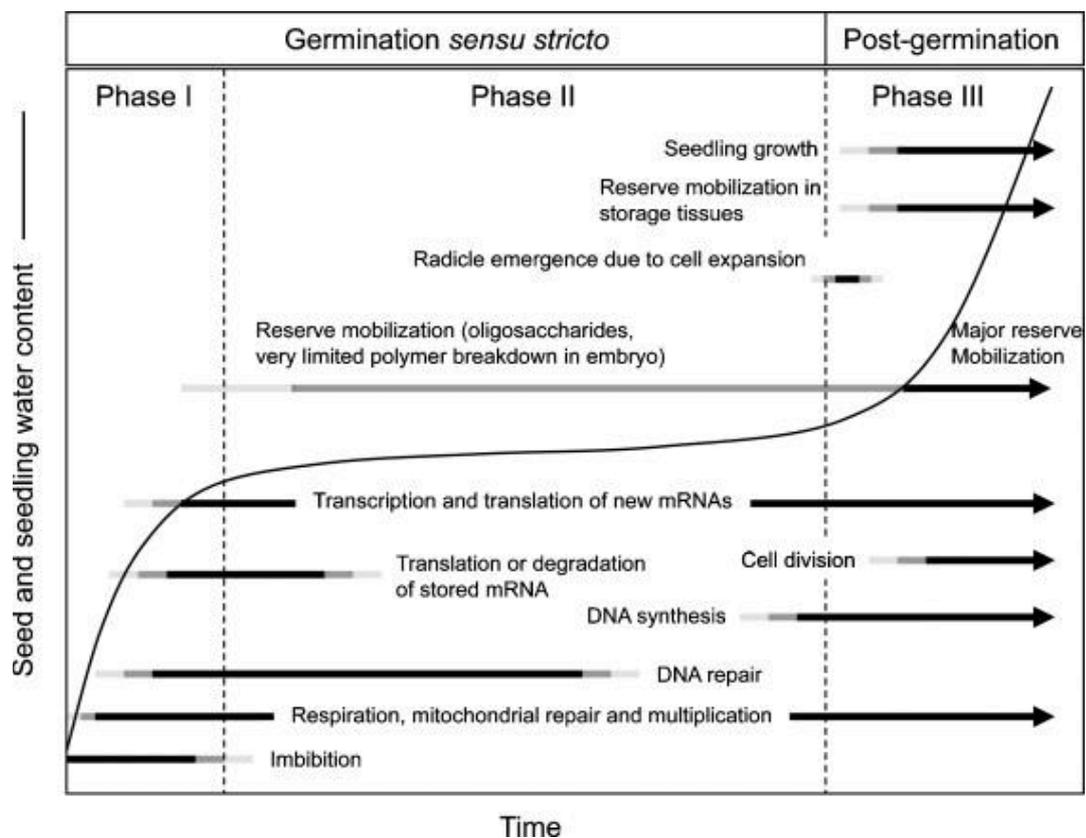


Figure 5 : Principaux événements liés aux trois phases successives de la germination des graines (Côme, 1970 ; Bewley, 1997).

II.2.3. Critères de la germination

Les lots de graines sont hétérogènes, et cette hétérogénéité se traduit par un étalement de la germination dans le temps. L'évolution des pourcentages de germination cumulés, en fonction du temps permet de tracer les courbes de germination, dont l'allure est sigmoïde (**Fig. 6**).

Ces courbes permettent de calculer le temps nécessaire à la germination de la première graine (temps de latence), le maximum de graines qui germent au final, la vitesse de germination représentée soit par le temps nécessaire pour obtenir 50% de graines germées ou bien 50% de la capacité de germination, ou encore le temps moyen de germination (inverse du coefficient de vélocité).

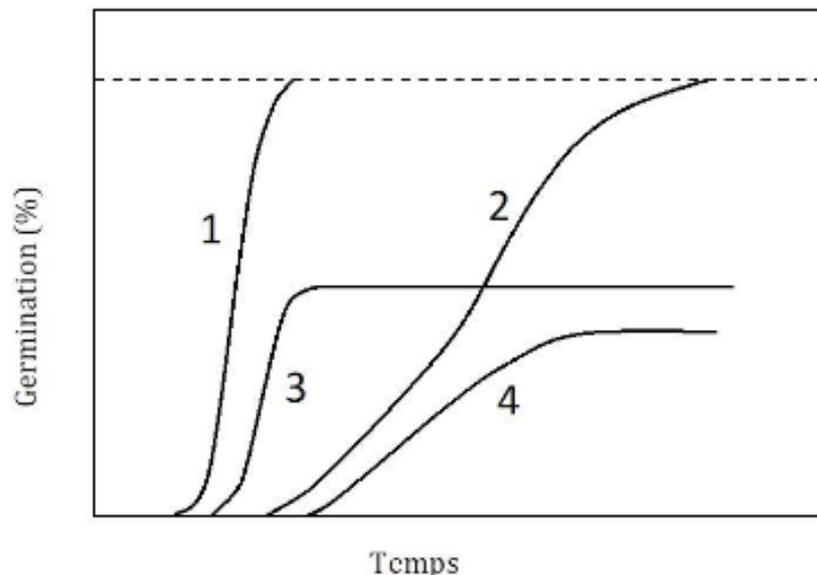


Figure 6 : Divers types théoriques de courbes de germination. Courbes 1 et 2 correspondant aux graines viables germant respectivement de façon homogène ou étalée dans le temps ; Courbes 3 et 4 correspondant aux graines ne germant pas toutes, et respectivement le taux maximal de germination est atteint rapidement ou plus lentement (**Côme et Corbineau, 1998, 2006**).

Ainsi, selon le lot de graines et les facteurs de l'environnement, toutes les graines sont capables de germer, mais la vitesse de germination est variable : certaines graines germent de façon homogène (**Fig. 6, courbe 1**), d'autres germent de façon étalée dans le temps (**Fig. 6, courbe 2**). Souvent les semences d'un lot ne germent pas toutes (**Fig. 6, courbes 3 et 4**), c'est l'inaptitude à la germination.

II.2.4. Inaptitudes à la germination

La qualité germinative d'une graine dépend de son génome (variété, taille, poids des graines), mais aussi d'autres facteurs : **(1)** facteurs avant récolte (techniques culturales, position des graines, âge de la plante mère) ; **(2)** facteurs de la récolte (stade de maturité des graines au moment de la récolte) ; et **(3)** facteurs après récolte (traitements auxquels les graines sont soumises comme le séchage, nettoyage et triage) (Côme, 1993).

Les facteurs de l'environnement régulent la germination (eau, température, oxygène et lumière). L'absence de germination d'une graine vivante peut résulter des conditions défavorables de l'environnement (températures trop basses ou trop élevées, apport insuffisant d'O₂, potentiel hydrique du sol trop bas). Les graines sont alors dans un état de quiescence, différent de l'état de dormance (Fig. 7) (Corbineau, 2020).

L'état de dormance correspond à une inaptitude à la germination dans des conditions environnementales apparemment favorables (présence d'eau, bonne oxygénation, température adéquate). Cette inaptitude à la germination provient de l'embryon (dormance embryonnaire), ou des enveloppes (inhibitions tégumentaires) qui peuvent être imperméables à l'eau et/ou à l'oxygène (Fig. 7) (Corbineau, 2020).

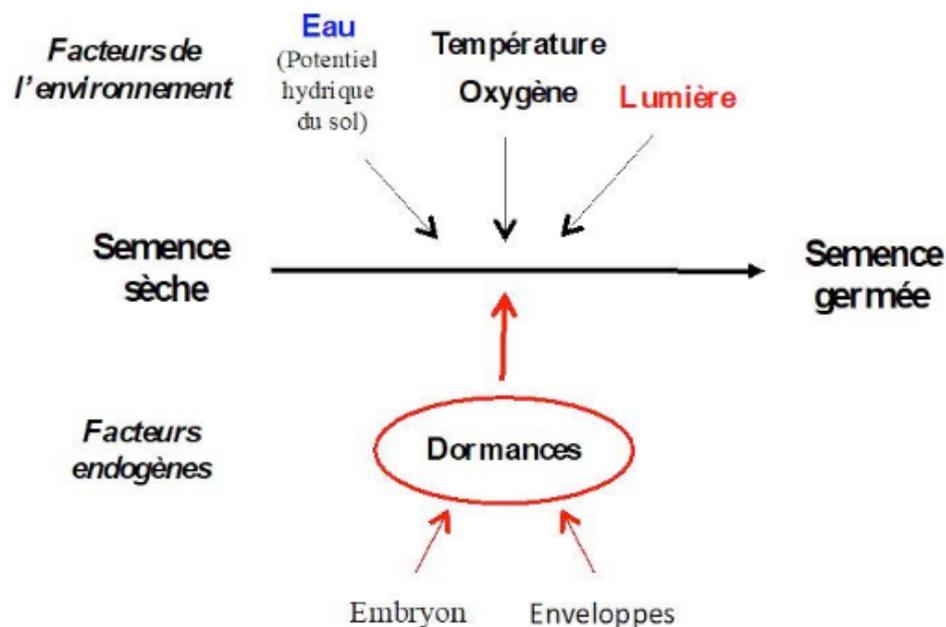


Figure 7 : Régulation de la germination par les facteurs de l'environnement et les inaptitudes à la germination résultant de processus de dormances (Corbineau, 2020).

II.3. Généralités sur les métaux lourds

II.3.1. Définition

Le mot métaux lourds désigne tous les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes caractérisés par une masse volumique supérieure à 5 g/cm^3 , ce qui est le cas pour la plupart des métaux de transition. Selon **Baize (1997)**, les éléments traces sont de l'ordre de 80 éléments chimiques constituant la croûte terrestre. L'appellation élément trace métallique vient du fait que certains éléments traces sont des métaux comme le Cd, Cr, Zn, Pb, Cu, tandis que d'autres ne sont pas métalliques. Cette appellation est mieux adaptée que métaux lourds, car certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement lourds, comme le Zn. De même, certains éléments toxiques sont métalloïdes, comme l'arsenic (**Fig. 8**).

Bloc s										Bloc p							
H																He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Bloc d										Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Te	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Bloc f														
Lanthanides		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
Transuraniens		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Cf	Bk	Es	Fm	Md	No	Lr		

Figure 8 : Classification périodique des éléments chimiques (**Fourest, 1993**).

II.3.2. Caractéristiques des métaux lourds

II.3.2.1. Propriétés physico-chimiques

Les métaux lourds possèdent les propriétés physiques générales des métaux, à savoir une bonne conductivité thermique et électrique. Ils sont fortement électropositifs et donnent par perte d'électrons des cations métalliques de charge variable. Ces cations métalliques peuvent former avec des ligands des liaisons ioniques, covalentes ou intermédiaires (**Sparks, 1998**).

II.3.2.2. Importance physiologique

Certains éléments comme le Cd, le Pb, le Hg ne sont pas essentiels aux organismes vivants, ils provoquent plutôt des effets toxiques. D'autres sont en revanche nécessaires en faible quantité, c'est le cas du Zn, Cu, Mn, Ni, Fe, B, Co et Se. Il s'agit d'oligo-éléments nécessaires à la nutrition, intervenant dans les réactions métaboliques et biochimiques. Leur absence peut entraîner des carences, mais l'augmentation de leur concentration les rend nocifs (Sparks, 1998).

II.3.2.3. Incidences sur l'environnement

La pollution provoquée par les métaux lourds impacte lourdement l'eau, les terres et l'air. C'est une conséquence des rejets d'usines métallurgiques et des tanneries, c'est aussi une dérive de l'agriculture, causée par l'épandage d'oligo-éléments et de l'utilisation de certains fongicides. Cette pollution peut aussi provenir de l'incinération de déchets et de la combustion de l'essence par les véhicules (Fig. 9) (Sparks, 1998).

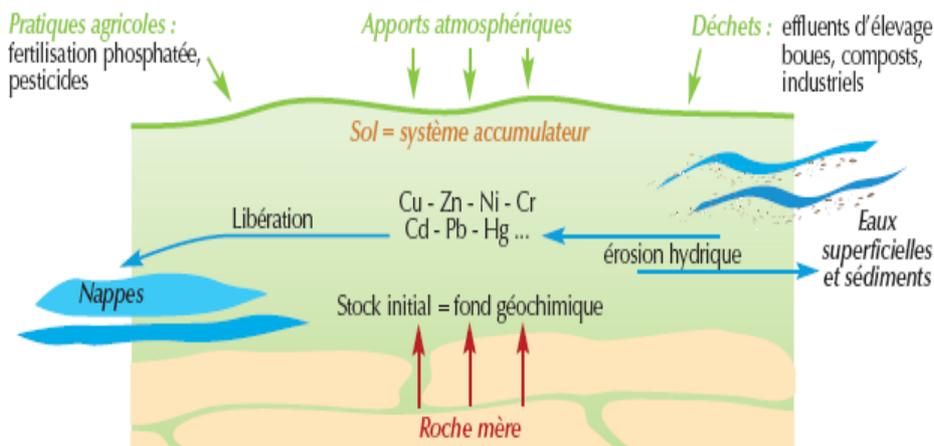


Figure 9 : Stocks et flux des éléments traces (Robert et Juste, 1997).

II.3.2.4. Répercussions sur les chaînes alimentaires

Le sol joue le rôle d'accumulateur vis-à-vis des éléments traces. Il s'agit pour ces composés minéraux d'une immobilisation sous des formes variées et encore mal connues. Le risque est lié à la libération de ces produits, sources potentielles pour la contamination des chaînes alimentaires, qui se répercutent négativement sur l'ensemble des organismes vivants (Fig. 9) (Morel, 1997).

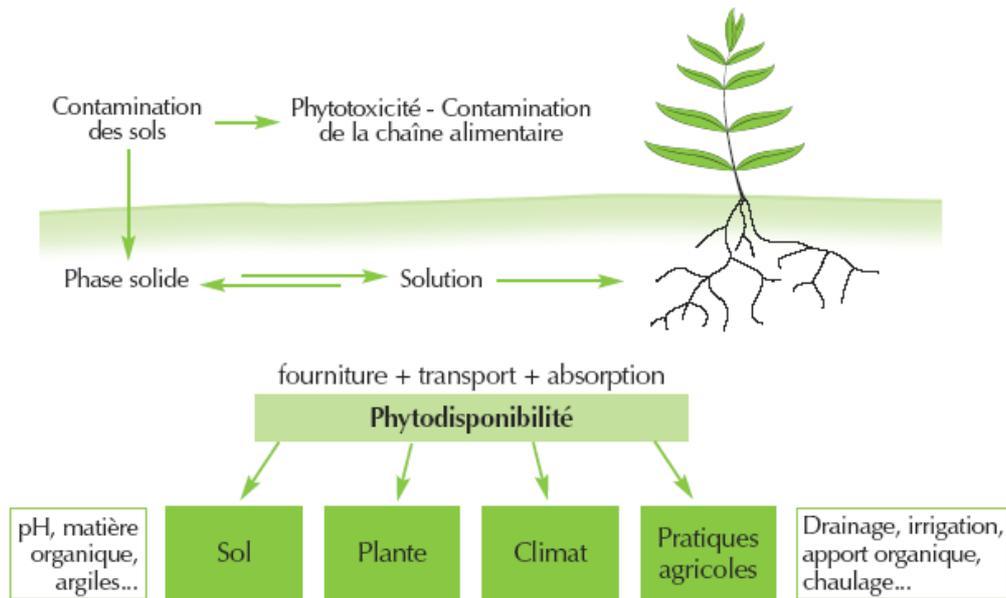


Figure 10 : Phytodisponibilité des éléments en traces dans les sols (Morel, 1997).

II.4. Eléments zinc / chrome

II.4.1. Zinc

Le zinc est l'élément chimique de numéro atomique 30 et de symbole Zn. Le corps simple zinc est un métal, considéré comme métal pauvre, ne répondant pas à la définition des éléments de transition de l'IUPAC, mais souvent assimilé aux métaux de transition. C'est le 24^{ème} élément le plus abondant dans l'écorce terrestre. Dans le milieu naturel, il est 600 fois plus abondant que le cadmium, environ 1500 fois plus abondant que le mercure.

II.4.1.1. Propriétés du zinc

Le zinc se caractérise par les propriétés physico-chimiques suivantes (**Tab. 1**) :

Tableau 1 : Caractéristiques et propriétés physico-chimiques de l'élément chimique zinc (www.lenntech.fr/periodique/elements/zn.htm).

Numéro atomique	30
Masse atomique	65,37 g.mol ⁻¹
Electronégativité de Pauling	1,6
Masse volumique	7,11 g.cm ⁻³ à 20 °C
Température de fusion	420 °C
Température d'ébullition	907 °C

Rayon atomique (Van der Waals)	0,138 nm
Rayon ionique	0,074 nm (+2)
Isotopes	5
Configuration électronique	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ²
Energie de première ionisation	904,5 kJ.mol ⁻¹
Energie de deuxième ionisation	1723 kJ.mol ⁻¹
Potentiel standard	- 0,763 V
Découverte	Connu dès l'antiquité

II.4.1.2. Effets du zinc sur la santé

Le zinc est un élément essentiel pour la santé de l'homme. Les carences en zinc provoquent une perte de l'appétit, une diminution des sensations de goût et d'odeur, les blessures cicatrisent lentement et on peut avoir des plaies. Trop de zinc peut provoquer des crampes d'estomac, des irritations de la peau, des vomissements, des nausées et de l'anémie. De très grandes quantités de zinc peuvent endommager le pancréas et perturber le métabolisme des protéines. Une exposition intensive au chlorure de zinc peut provoquer des désordres respiratoires (Roohani et al. 2013 ; Chasapis et al. 2020).

II.4.1.3. Impacts du zinc sur l'environnement

L'eau est polluée en zinc du fait de la présence de grandes quantités dans les eaux usées des usines industrielles. L'une des conséquences est que les fleuves déposent des boues polluées en zinc sur leurs rives. Le zinc peut aussi augmenter l'acidité de l'eau et les poissons qui y vivent peuvent en accumuler dans leur organisme.

D'importantes quantités en Zn peuvent être trouvées dans le sol. Le zinc soluble dans l'eau qui se trouve dans le sol peut contaminer les eaux souterraines et menacer le monde des animaux et des plantes. En sol riche en Zn, seul un nombre limité de plantes a des chances de survivre. C'est la raison de l'absence de diversité des plantes près des usines manipulant du Zn.

Le Zn peut aussi interrompre l'activité du sol, car il a une influence négative sur l'activité des microorganismes et les vers de terre. La décomposition de la matière organique peut être sérieusement ralentie de ce fait (Mertens and Smolders, 2012 ; Okereafor et al. 2020 ; Stanton et al. 2021).

II.4.2. Chrome

Le chrome est l'élément chimique de numéro atomique 24 et de symbole Cr. Le corps simple est un métal de transition nullement rare, parfois moyennement abondant dans la croûte terrestre (clarke ou teneur moyenne de l'ordre de 100 à 200 g par tonne dans la croûte terrestre). L'élément est assez abondant dans des roches magmatiques ultrabasiques.

II.4.2.1. Propriétés du chrome

Le chrome se caractérise par les propriétés physico-chimiques suivantes (**Tab. 2**) :

Tableau 2 : Caractéristiques et propriétés physico-chimiques de l'élément chimique chrome (www.lenntech.fr/periodique/elements/cr.htm).

Numéro atomique	24
Masse atomique	51,996 g.mol ⁻¹
Electronégativité de Pauling	1,6
Masse volumique	7,19 g.cm ⁻³ à 20 °C
Température de fusion	1875 °C
Température d'ébullition	2672 °C
Rayon atomique (Van der Waals)	0,127 nm
Rayon ionique	0,061 nm (+3) ; 0,044 nm (+6)
Isotopes	5
Configuration électronique	[Ar] 3d ⁴ 4s ²
Energie de première ionisation	651,1 kJ.mol ⁻¹
Potentiel standard	- 0,71 V (Cr ³⁺ / Cr)
Découverte	Vauquelin en 1797

II.4.2.2. Effets du chrome sur la santé

Le chrome III est un nutriment essentiel pour l'homme, une carence peut provoquer des problèmes au cœur, des perturbations du métabolisme et du diabète. L'absorption en excès du Cr III peut aussi provoquer des ennuis pour la santé, par exemple des éruptions cutanées. Le chrome VI est plutôt plus dangereux pour la santé, principalement pour les personnes travaillant dans l'industrie de l'acier et du textile, et pour les fumeurs du tabac. Le Cr VI peut provoquer des éruptions cutanées, des irritations nasales, des problèmes respiratoires, des ulcères, un système immunitaire affaibli, des dommages portés au foie et

aux reins, des cancers et des altérations du matériel génétique (**Maret, 2019 ; Murthy et al. 2022**).

II.4.2.3. Impacts du chrome sur l'environnement

Les quantités de chrome détectées dans l'hydrosphère, la pédosphère, l'atmosphère et la biosphère sont liées pour l'essentiel à des émissions d'origine industrielle. Chez les animaux, le Cr peut provoquer des problèmes respiratoires, une capacité plus faible à lutter contre les maladies, des défauts à la naissance, une infertilité ou la formation de tumeurs.

Le Cr n'est pas connu pour s'accumuler dans le corps des poissons, mais des concentrations élevées peuvent endommager les ouïes des poissons nageant dans des eaux proches du point de rejet de produits en métal.

Les plantes absorbent en général le Cr III, mais lorsque les concentrations dépassent une certaine valeur, des conséquences négatives peuvent toujours se produire (**Oliveira, 2012 ; Dotaniya et al. 2014**).

II.5. Ajustement osmotique par accumulation de la proline

II.5.1. Ajustement osmotique

L'ajustement osmotique est un mécanisme majeur d'adaptation des plantes aux conditions du stress. Il constitue le processus permettant aux cellules de maintenir leur turgescence sous contrainte biotique ou abiotique, grâce à l'accumulation active d'osmolytes dits compatibles (**Smirnoff, 1998 ; Nuccio et al. 1999 ; Cushman and Bohnert, 2000**). Ces osmolytes entre autres fonctions, possèdent la faculté de diminuer le potentiel hydrique cellulaire et de maintenir le gradient favorable du potentiel hydrique (**Zhang et al. 1999**). Certaines plantes vont devoir accumuler ces composés organiques compatibles de faible poids moléculaire, tel que la proline (**Nuccio et al. 1999 ; Cushman and Bohnert, 2000**).

II.5.2. Accumulation de la proline

Lors d'un stress, les plantes ont cette capacité d'une synthèse et d'accumulation de solutés non toxiques, qui n'interfèrent pas avec la structure fine et le fonctionnement des cellules. La proline en est l'un des solutés les plus communs et le plus largement répandu chez les plantes (**Bohnert and Sheveleva, 1998**).

La proline a été découverte par **Willaster** au cours d'un dosage de l'ornithine. Elle a été extraite pour la première fois dans les hydrolysats acides de caséine par **Fisher** en 1901. Il s'agit de l'un des 20 acides aminés naturels, qui rentre dans la constitution des protéines. Son poids moléculaire est de 115 g et sa formule chimique détaillée est présentée ci-dessous (**Fig. 11**).

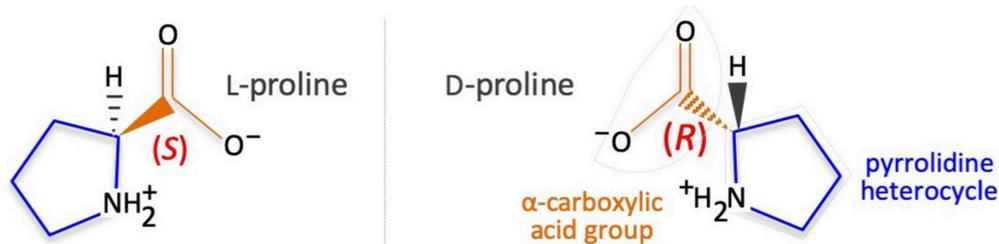


Figure 11 : Représentation de la structure des 2 formes énantiomères de la proline L et D correspondant à l'acide pyrrolidine-2-carboxylique (**Patriarca et al. 2021**).

Lors d'un stress, l'accumulation de la proline est la conséquence d'une stimulation des processus de sa biosynthèse *de novo* (**Hong et al. 2000**) et la répression des processus de dégradation par inhibition de l'activité de la proline déshydrogénase (**Delauney and Verma, 1993 ; Peng et al. 1996**).

II.5.2.1. Biosynthèse de la proline

La proline est synthétisée principalement par la voie de l'acide glutamique via deux intermédiaires : l'acide glutamique γ -semi-aldéhyde (GSA) et la Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate (P5C). Deux enzymes catalysent cette voie : la Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate synthétase (P5CS) et la Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate réductase (P5CR) (**Fig. 12**) (**Delauney and Verma, 1993 ; Meena et al. 2019**).

La proline peut aussi être synthétisée via la voie de l'ornithine. Cette voie de synthèse pourrait suivre deux parcours de transamination. Le premier donne depuis l'ornithine de l'acide semi-aldéhyde glutamique (GSA), qui pourrait suivre la même voie du glutamate décrite précédemment (**Fig. 12**). Le second parcours donne de l'acide α -céto- δ -aminovalérique, qui subit à son tour une cyclisation et une réduction donnant à la fin de la proline (**Meena et al. 2019**).

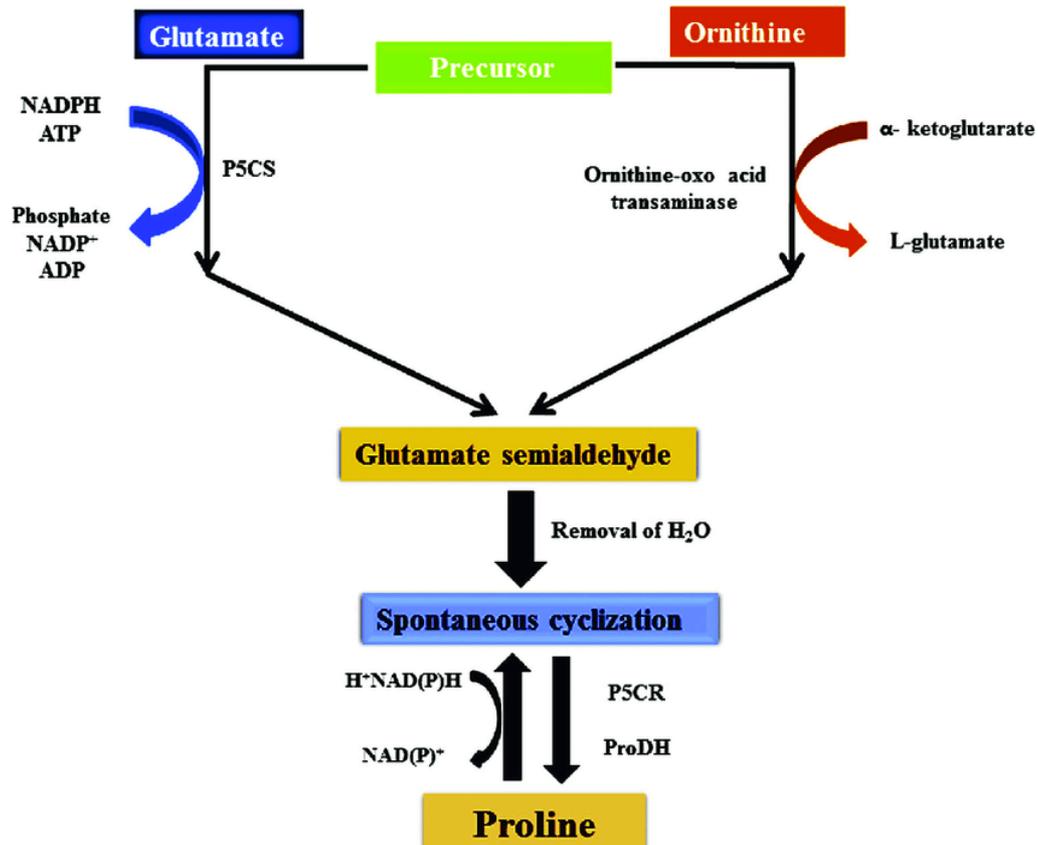


Figure 12 : Voies de biosynthèse de la proline via le glutamate ou l'ornithine (Meena et al. 2019).

II.5.2.2. Catabolisme de la proline

La proline est dégradée en glutamate dans la mitochondrie, via la Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate (P5C) et l'acide glutamique γ -semi-aldéhyde (GSA). La proline déshydrogénase (ProDH) catalyse la conversion de la proline en P5C et la Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate déshydrogénase (P5CDH) oxide la P5C en glutamate (Fig. 13) (Trovato et al. 2008; Szabados and Savouré, 2010).

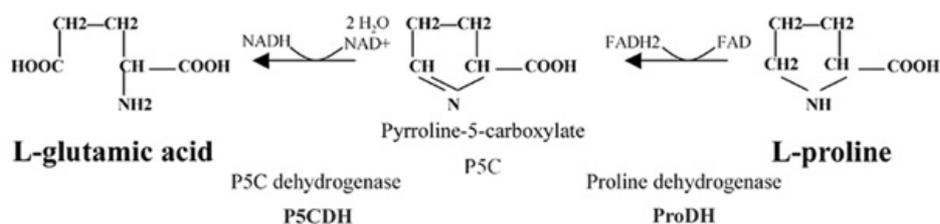


Figure 13 : Catabolisme de la proline (Trovato et al. 2008).

II.5.3. Autres rôles de la proline

En plus de son rôle comme osmolyte compatible, la proline joue de multiples rôles comme stabilisateur des structures protéiniques. Elle est source de carbone et d'azote à la levée des stress et agit comme molécule signal, modulant les fonctions mitochondriales et/ou l'expression de gènes spécifiques. Elle intervient également dans la détoxification des espèces réactives d'O₂ protégeant ainsi les systèmes membranaires (**Fig. 14**) (**Hong et al. 2000 ; Szabados and Saviouré, 2010 ; Verslues and Sharma, 2010 ; Siddique et al. 2018**).

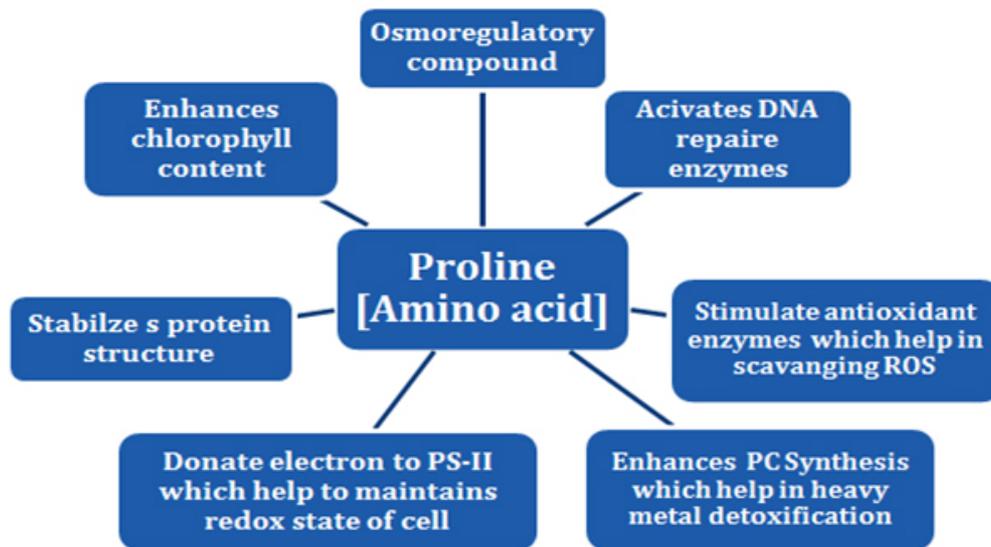


Figure 14 : Les multiples rôles joués par la proline lors d'un stress (**Abbas et al. 2018**).

MATÉRIEL & MÉTHODES

III.1. Matériel

III.1.1. Matériel végétal

III.1.1.1. Origine des graines

Les graines de *Lavandula stoechas* L. utilisées dans nos différentes expérimentations ont été récoltées au mois de juin de l'année 2020 dans la région de *Tazeboujte* située dans la wilaya de Bejaia (région du nord-est de l'Algérie ; 36°44' N ; 05°01' E).

III.1.1.2. Désinfection des graines

Les graines sont minutieusement récupérées depuis les épis des fleurs bleues de la lavande papillon. Elles sont désinfectées par un passage de 3 à 5 mn dans de l'eau de javel (5 %), puis rincées abondamment à l'eau distillée. Les graines récupérées à l'aide d'une passoire sont étalées sur du papier absorbant pour les sécher (**Fig. 15**).

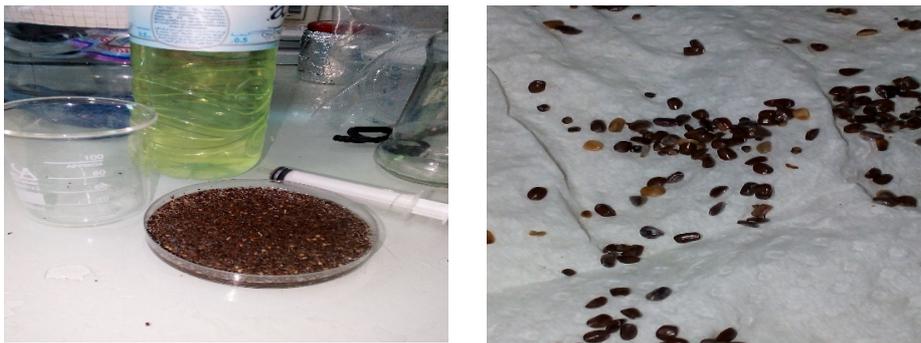


Figure 15 : Désinfection de surface des graines de *Lavandula stoechas* L. par de l'eau de javel à 5% et étalement pour séchage avant une utilisation pour la germination.

III.1.1.3. Germination des graines

Les graines de la lavande séchées sont mises à germer dans des boîtes de Pétri, tapissées de papier absorbant. Chacune des boîtes contenant 25 graines a été préalablement humidifiée par 7 ml d'eau distillée correspondant au lot témoin ; 7 ml d'une concentration connue de $ZnSO_4$ correspondant au lot traité au zinc et par 7 ml d'une concentration connue de $K_2Cr_2O_7$ correspondant au lot traité au chrome. Pour chacun des lots, les expérimentations ont été répétées 3 fois et chacune des boîtes a été recouverte de son couvercle, puis scellée par du parafilm afin d'éviter tout départ d'eau ou de la solution stressante. Ainsi préparées, les boîtes sont déposées dans une étuve à l'obscurité et à une température de 20°C.

Chaque 48 heures, les graines de la lavande sont contrôlées : les graines qui ont germées sont dénombrées (**Fig. 16**). Le critère adopté est celui de la percée de la radicule (**Evenari, 1957**). Dès que la radicule perce le tégument, la graine est comptabilisée comme une graine germée. Ces dénombrements sont répétés pendant 20 jours, durée totale de suivi des germinations.



Figure 16 : Graines de *Lavandula stoechas* L. en phase de germination. Respectivement de gauche à droite : lot de graines témoins, lot de graines traitées au zinc et lot de graines traitées au chrome.

III.1.1.4. Plantules obtenues

Au bout des expérimentations de la phase germinative, les jeunes plantules issues ont été réservées pour étudier le statut hydrique, les mesures en longueur des parties racinaires et aériennes, ainsi que l'extraction et le dosage de la proline.

III.1.2. Préparation des solutions métalliques

III.1.2.1. Solution de $ZnSO_4$

Le sulfate de zinc utilisé est heptahydraté ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$). Il se présente sous l'apparence de cristaux inodores et au goût astringent (**Fig. 17**).



Masse molaire : 287,55 g/mol

Masse volumique : 1,97 g/cm³

Solubilité : 960 g/l⁻¹ à 20°C dans l'eau.

Formule : $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$

Nom : Sulfate de zinc heptahydraté.

Figure 17 : Présentation des cristaux de sulfate de zinc heptahydraté (<http://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/1758754>) et ses quelques caractéristiques physico-chimiques.

Pour imposer un stress métallique au zinc, le $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ a été utilisé en solution aux concentrations de 100, 200, 300 et 400 ppm.

III.1.2.2. Solution de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$

Le dichromate de potassium est un solide ionique de couleur rouge orangée, qui se dissocie dans l'eau en ions dichromate et en ions potassium (**Fig. 18**).



Masse molaire : 294,185 g/mol

Densité : 2,676 g/cm³

Solubilité : 13 g/100 ml à 20°C dans l'eau.

Apparence : Rouge-orangée

Formule : $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$

Nom IUPAC : Dichromate de potassium

Figure 18 : Apparence générale des cristaux de dichromate de potassium (http://en.wikipedia.org/wiki/Potassium_dichromate) et ses quelques caractéristiques physico-chimiques.

Pour imposer un stress métallique au chrome, le $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ a été utilisé en solution aux concentrations de 100, 200, 300 et 400 ppm.

III.2. Méthodes

III.2.1. Méthodes appliquées à la germination

III.2.1.1. Pourcentages cumulés de germination

Les graines germées sont dénombrées tous les deux jours pendant les vingt jours de la durée des expérimentations. Les pourcentages cumulés moyens de germination sont exprimés par le rapport du nombre cumulé de graines germées au jour j sur le nombre total de graines mises à germer rapporté à 100.

$$\% \text{ cumulés} = \frac{\text{Nombre cumulé de graines germées au jour } j}{\text{Nombre total de graines mises à germer}} \times 100$$

III.2.1.2. Pourcentages finaux de germination

Au terme du 20^{ème} jour du suivi de la germination, les pourcentages finaux de germination des graines germées ont été déterminés. Ils ont été calculés du rapport du nombre total des graines germées au 20^{ème} jour sur le nombre total de graines mises à germer rapporté à 100 (Doran and Gunn, 1987).

$$\% \text{ finaux de germination} = \frac{\text{Nombre total de graines germées}}{\text{Nombre total de graines mises à germer}} \times 100$$

III.2.1.3. Temps moyens de germination

Le temps moyen de germination est déterminé d'après la formule suivante (Redondo-Gómez et al. 2007) :

$$\text{Temps moyen de germination (jours)} = \sum (N_i \times D_i) / N$$

Où N_i est le nombre de graines germées au jour i , D_i est la période de germination en jours et N est le nombre total de graines germées.

III.2.2. Statut de l'eau

III.2.2.1. Poids frais

Les plantules récupérées à l'issue de la germination sont pesées séparément afin de mesurer leur poids frais (**PF**) directement lu à la balance électronique de précision.

III.2.2.2. Poids sec

Le poids sec (**PS**) des plantules nécessite une seconde pesée à la balance électronique de précision. Cette pesée est réalisée après une dessiccation de 48 heures au four, réglé au préalable à 80°C.

III.2.2.3. Teneur en eau

La teneur en eau de chacune des plantules est déterminée selon la relation suivante :

$$\text{Teneur en eau (en \%)} = \frac{\text{Poids frais} - \text{Poids sec}}{\text{Poids frais}} \times 100$$

III.2.3. Mesures biométriques

III.2.3.1. Parties racinaires

Avant la dessiccation des plantules, leurs parties racinaires ont été mesurées en utilisant du papier millimétré, et ce après avoir pris soin d'étaler convenablement la partie racinaire le long de la feuille millimétré.

III.2.3.2. Parties aériennes

Les parties aériennes ont été mesurées de la même façon que les parties racinaires en utilisant du papier millimétré.

III.2.4. Extraction et dosage de la proline

III.2.4.1. Extraction

Les matières sèches de l'ensemble des plantules ayant germés dans une seule boîte de pétri de chacun des 3 lots (témoins, traités au Zn et au Cr) ont été utilisées pour l'extraction de la proline. Elles sont broyées séparément à sec, puis dans 3 mL de méthanol qu'on rajoute au fur et à mesure au broyat. Après récupération des extraits en tubes à essais et une agitation au vortex, les tubes sont portés au bain-marie pendant 1 h à 85°C. Pour éviter l'évaporation du méthanol durant le chauffage, les tubes sont hermétiquement fermés en rajoutant aux bouchons du parafilm.

III.2.4.2. Dosage

La méthode de **Troll et Lindsley (1955)** simplifiée par **Bates et al. (1973)** est utilisée pour le dosage de la proline. Cette dernière réagit en milieu acide et à chaud avec la ninhydrine, en donnant un composé rouge orangé soluble dans le toluène.

Pour 1 mL de chacun des extraits méthanoliques prélevé, sont rajoutés 1 mL d'acide acétique glacial et 1 mL de réactif à ninhydrine (1,25 g de ninhydrine dissous dans 30 mL d'acide acétique glacial + 7,5 mL d'acide orthophosphorique à 85% + 12,5 mL d'eau distillée). Après agitation au vortex, le mélange est porté à ébullition dans un bain-marie durant 1 h.

Après refroidissement des tubes, 4 mL de toluène sont rajoutés au mélange ainsi qu'une pincée de Na₂SO₄ pour éliminer l'eau qu'il renferme. Après une agitation énergique au vortex, deux phases se développent au bout d'une nuit de décantation et la phase

supérieure contenant la proline est récupérée à l'aide d'une pipette Pasteur. La densité optique est mesurée au spectrophotomètre SPECORD 210 à une longueur d'onde de 515 nm.

III.2.4.3. Courbe étalon

La courbe étalon est réalisée à l'aide d'une solution mère de proline à 1 mM. Les dilutions préparées varient de 0,1 à 0,6 mM (**Fig. 19**). La quantité en proline moyenne de 3 essais pour chacun des lots et pour chacune des concentrations appliquées sera exprimée en mg/g de poids frais ou bien en mg/100 mg de poids sec.

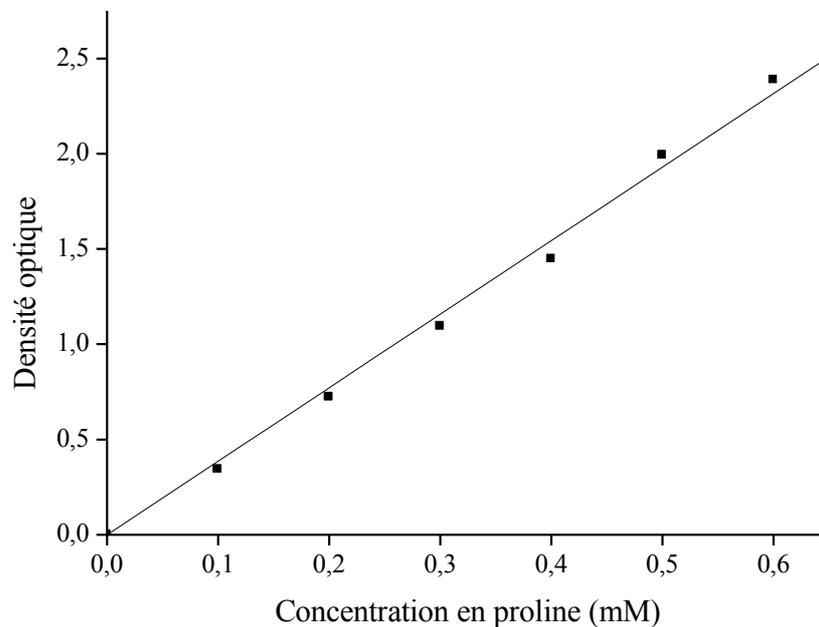


Figure 19 : Courbe étalon de la proline réalisée à l'aide d'une solution mère de proline de 1 mM (densité optique lue à $\lambda = 515$ nm).

III.2.5. Etude statistique

Les résultats présentés expriment pour l'ensemble des analyses une valeur moyenne de 3 répétitions \pm écart type. Les paramètres liés au statut de l'eau, les mesures biométriques et la quantification de la proline ont été soumis à une analyse de la variance de tous les effets et le test LSD pour les comparaisons post-hoc ($P = 0,05$). Les analyses ont été effectuées à l'aide de STATISTICA 5.5 (StatSoft 1999).

RÉSULTATS & DISCUSSION

IV.1. Résultats

IV.1.1. Résultats relatifs à la germination

IV.1.1.1. Pourcentages cumulés de germination des graines traitées au ZnSO₄

Les graines de *L. stoechas* L. ne commencent leur germination qu'au delà du 2^{ème} jour. Le lot des témoins (0 ppm) enregistre un accroissement régulier jusqu'au 12^{ème} jour où le maximum de germination est atteint, puis n'évolue plus le reste du temps des dénombrements. Pour les graines traitées au Zn, la concentration de 100 ppm donne un % de graines germées de près de 20% au 4^{ème} jour, qui atteint rapidement 75% au terme du 6^{ème} jour, puis évolue peu le reste du temps des décomptes puisque le maximum de près de 90% est atteint au 10^{ème} jour et n'augmente plus au cours du temps (**Fig. 20**).

Avec une application en Zn de 200 ppm, environ 34% des graines germent au 4^{ème} jour, ce taux passe à 50% au 6^{ème} jour, puis comme dans le cas du traitement avec une concentration de 100 ppm, passe à 90% au 10^{ème} jour des dénombrements, sans pour autant augmenter le reste du temps du suivi de la germination (**Fig. 20**).

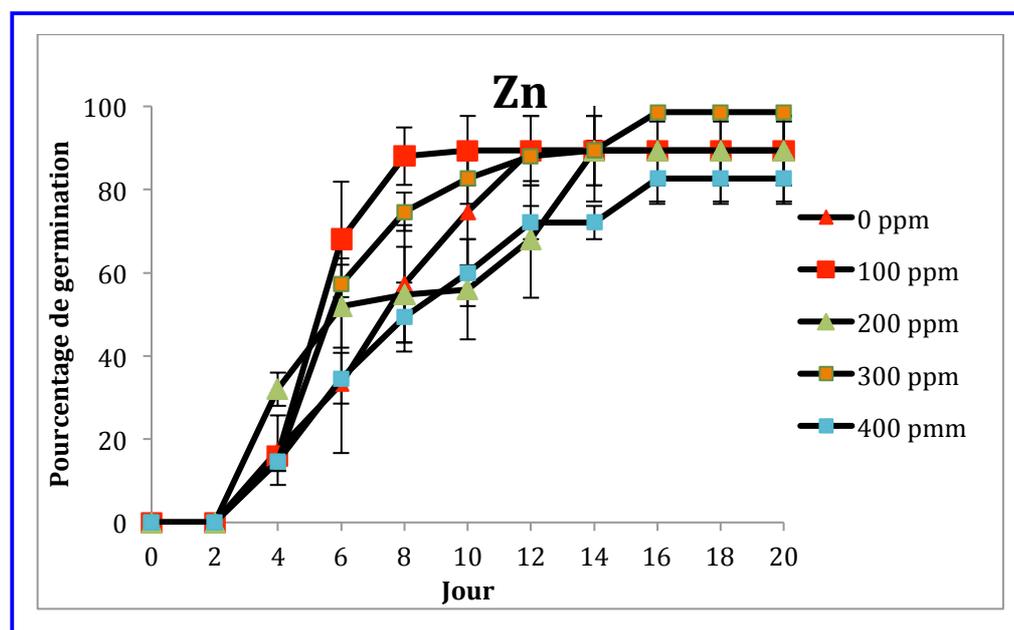


Figure 20 : Evolution des pourcentages cumulés moyens de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. témoins [0 ppm] et traitées par différentes concentrations en ZnSO₄ [100 ; 200 ; 300 et 400 ppm] en fonction du temps.

Une application de 300 ppm en zinc donne davantage de graines qui germent, puisque le pourcentage de graines germées est de 59% au 6^{ème} jour, qui se poursuit jusqu'au 14^{ème} jour pour atteindre 90% et ne s'arrête pas 48 heures après, puisqu'un pourcentage de 99% de graines germées est atteint (**Fig. 20**).

Avec une concentration de 400 ppm, les pourcentages de germination cumulés évoluent lentement au cours du temps pour atteindre au 16^{ème} jour un maximum de 82% de graines germées. Ce maximum atteint n'évolue plus le reste du temps du suivi des dénombrements (**Fig. 20**).

IV.1.1.2. Pourcentages finaux de germination des graines traitées au ZnSO₄

Au bout du 20^{ème} jour de la germination, les pourcentages finaux de graines germées tourne autour de 89,2% pour les graines qui n'ont pas été traitées par le zinc. Celles qui sont traitées par les concentrations de 100, 200 ou bien 400 ppm en ZnSO₄ donnent les mêmes pourcentages finaux (89,3%), équivalents à celui enregistré déjà chez les témoins. La concentration de 300 ppm donne en revanche, un meilleur pourcentage de graines germées au final, puisqu'il culmine autour de 98,6% (**Fig. 21**).

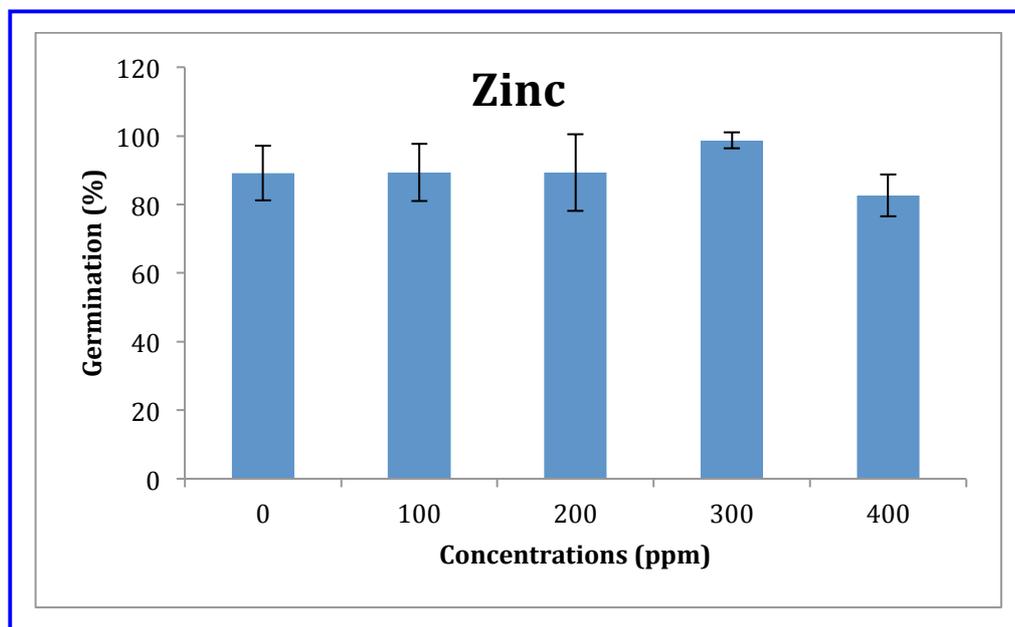


Figure 21 : Effets des différentes concentrations en ZnSO₄ [100 ; 200 ; 300 et 400 ppm] sur les pourcentages finaux de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. comparativement aux graines témoins [0 ppm].

IV.1.1.3. Temps moyens de germination des graines traitées au ZnSO₄

Pour germer, les graines témoins de *L. stoechas* L. mettent en moyenne un temps de 6,8 jours. Avec le traitement, la concentration en ZnSO₄ la plus faible [100 ppm] réduit légèrement ce temps à 6,15 jours. Par contre, les autres concentrations appliquées tendent à augmenter ce temps moyen de germination, qui passe à 7,23 jours pour une application en zinc de [200 ppm] ; à 7,75 jours pour une application en zinc de [300 ppm] et à 8,68 jours pour la plus forte application en zinc de [400 ppm] (**Fig. 22**).

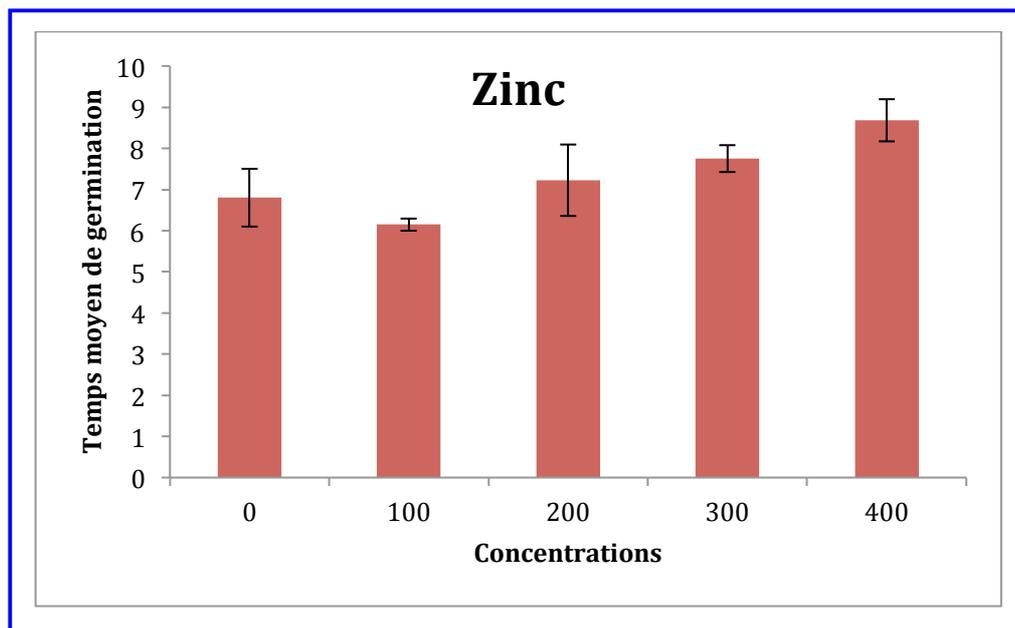


Figure 22 : Effets des différentes concentrations en ZnSO₄ [100 ; 200 ; 300 et 400 ppm] sur les temps moyens de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. comparativement au temps moyen de germination mis par les graines témoins [0 ppm].

IV.1.1.4. Pourcentages cumulés de germination des graines traitées au K₂Cr₂O₇

Les courbes de germination enregistrées pour le traitement au Cr des graines de *L. stoechas* L. sont toutes de type sigmoïde au même titre que celle des graines témoins.

Le traitement induit par une concentration de 100 ppm en Cr engendre au bout du 4^{ème} jour près de 40% de graines germées, qui double rapidement au bout du 6^{ème} jour (83%) et atteint un % maximum de 93% de graines germées au bout du 8^{ème} jour, sans pour autant augmenter le reste du temps des expérimentations (**Fig. 23**).

Avec un traitement de 200 ppm en Cr, la germination est retardée les premiers jours lorsqu'on compare avec les graines traitées par une concentration de 100 ppm. En effet, seulement 15% des graines germent au 4^{ème} jour, ce pourcentage passe à 70% au 6^{ème} jour, puis atteint finalement un % élevé de graines germées (94%) au 8^{ème} jour. A partir du 8^{ème} jour jusqu'au 20^{ème} jour, le % de germination reste stable et n'évolue plus (**Fig. 23**).

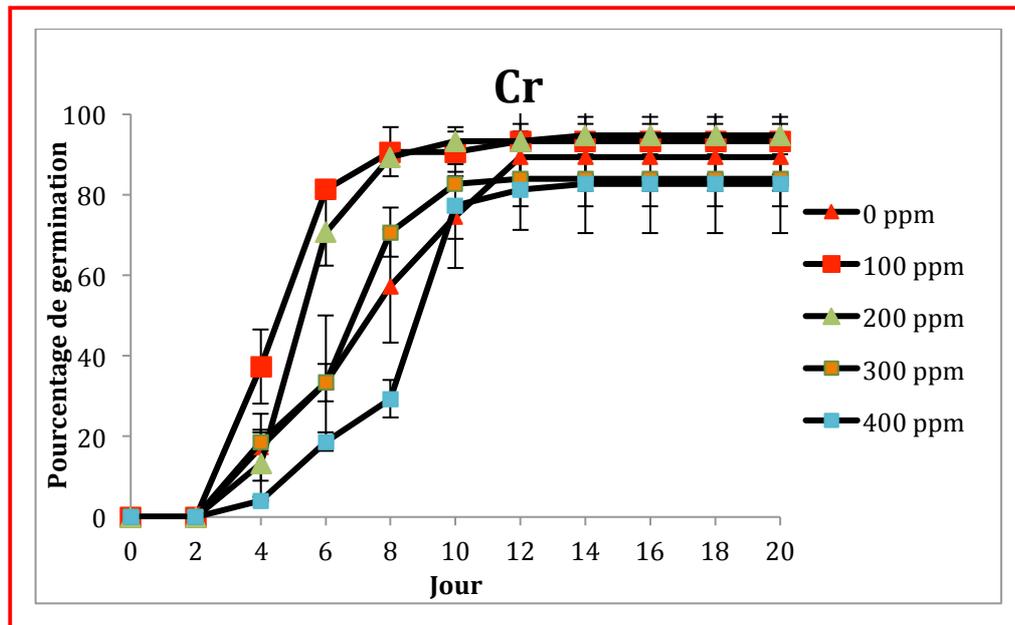


Figure 23 : Evolution des pourcentages cumulés moyens de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. témoins [0 ppm] et traitées par différentes concentrations en $K_2Cr_2O_7$ [100 ; 200 ; 300 et 400 ppm] en fonction du temps.

Un traitement de 300 ppm en chrome donne encore moins de graines qui germent, puisque le pourcentage de graines germées n'est que de 20% au 4^{ème} jour, qui se poursuit assez lentement pour finalement atteindre 84% au 10^{ème} jour, puis n'évolue plus au cours du reste du temps des expérimentations (**Fig. 23**).

Avec le traitement le plus fort en Cr (400 ppm), les pourcentages de germination cumulés évoluent aussi lentement au cours du temps. Seulement 5% des graines germent au 4^{ème} jour, 38% au 8^{ème} jour. Ce pourcentage double finalement entre le 8^{ème} et le 12^{ème} jour du suivi de la germination pour atteindre un pourcentage cumulé de 82%. C'est également le maximum de graines qui germent, puisque ce pourcentage ainsi atteint n'évolue plus le reste du temps du suivi des dénombrements (**Fig. 23**).

IV.1.1.5. Pourcentages finaux de germination des graines traitées au $K_2Cr_2O_7$

Le pourcentage final de germination enregistré au bout du 20^{ème} jour est de 89,2% pour les graines témoins. Celui des graines traitées par différentes concentrations en Cr se décline en 2 parties : les traitements de 100 et 200 ppm donnent des pourcentages respectivement de 93,3 et 94,6% légèrement supérieurs à ceux des témoins ; tandis que les traitements de 300 et 400 ppm donnent des pourcentages respectivement de 84,0 et 82,6% assez inférieurs de ceux des témoins et de ceux des traités par les concentrations de 100 et 200 ppm (**Fig. 24**).

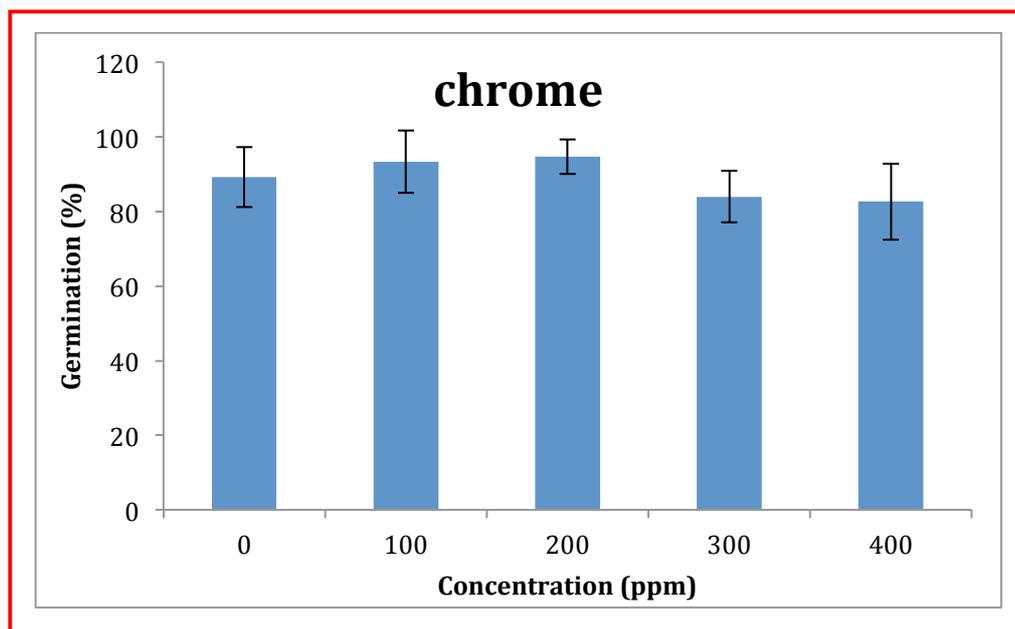


Figure 24 : Effets des différentes concentrations en $K_2Cr_2O_7$ [100 ; 200 ; 300 et 400 ppm] sur les pourcentages finaux de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. comparativement aux graines témoins [0 ppm].

IV.1.1.6. Temps moyens de germination des graines traitées au $K_2Cr_2O_7$

Avec le traitement au $K_2Cr_2O_7$, le temps moyen de germination des graines de *L. stoechas* L. ne fait que s'allonger, proportionnellement à l'élévation de la concentration de l'agent traitant. En effet, la concentration de 100 ppm donne un temps moyen de germination de 5,56 jours, qui augmente jusqu'à 6,36 jours avec le traitement de 200 ppm, puis à 7,11 jours avec le traitement de 300 ppm, pour finalement nécessiter 8,87 jours avec le traitement le plus fort de 400 ppm en Cr (**Fig. 25**).

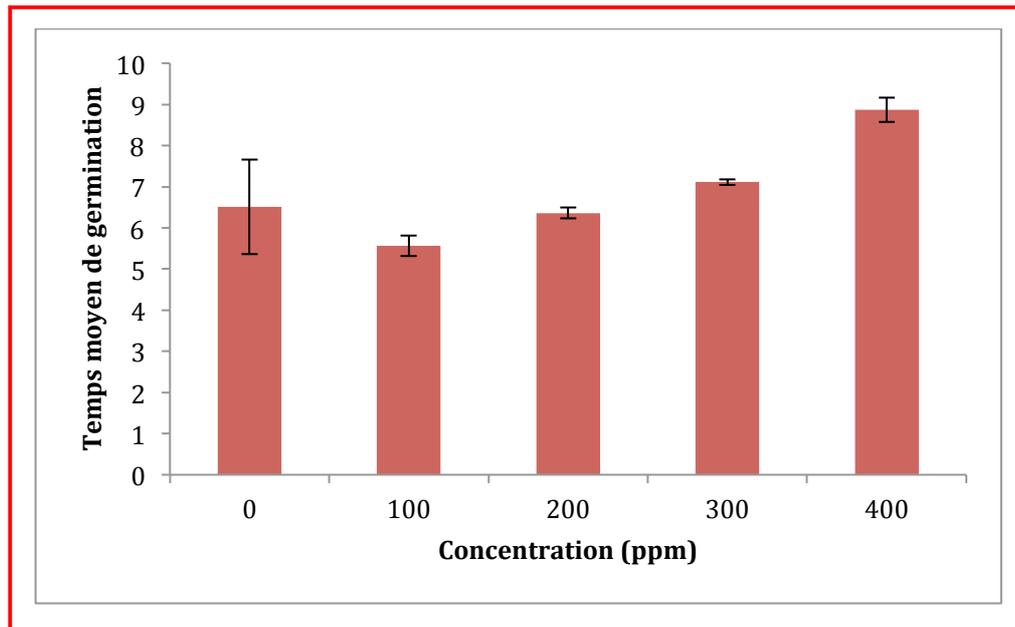


Figure 25 : Effets des différentes concentrations en $K_2Cr_2O_7$ [100 ; 200 ; 300 et 400 ppm] sur les temps moyens de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. comparativement au temps moyen de germination mis par les graines témoins [0 ppm].

IV.1.1.7. Comparatif entre les lots de graines traités au $ZnSO_4$ / $K_2Cr_2O_7$

Les taux cumulés moyens de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. ont été suivis au cours du temps (20 jours). Les observations principales déduites de l'analyse des différentes courbes obtenues montrent :

(1) dans nos conditions expérimentales choisies (obscurité et température de $20^\circ C$), un temps de latence est nécessaire pour la germination des graines de *L. stoechas* L. En effet, aucune des graines, qu'elle soit traitée au Zn ou au Cr n'arrive à germer au 2^{ème} jour. Les germinations sont observées au 4^{ème} jour et sont dépendantes de la concentration de l'agent traitant appliqué ;

(2) Le traitement au Zn de 200 ppm donne les meilleurs % cumulés de germination dès le 4^{ème} jour, plus que les 3 autres traitements et plus que les graines témoins. Au 8^{ème} jour, c'est plutôt la concentration de 100 et 300 ppm en Zn qui prend le dessus sur les 2 autres concentrations et sur les graines témoins. Pour ce qui est du traitement au Cr, la distinction est évidente au 4^{ème} jour pour la concentration de 100 ppm vis-à-vis des 3 autres traitements. A partir du 6^{ème} jour et jusqu'au 8^{ème} jour, cette évidence s'estompe pour les concentrations de 100 et 200 ppm, mais demeure pour la concentration de 300 ppm ;

(3) Le 14^{ème} jour de traitement au Zn correspond au point de jonction entre les concentrations de 100, 200 et 300 ppm pour ce qui est des % cumulés moyens de germination, plus que le traitement de 400 ppm. La distinction se fait au 16^{ème} jour où la concentration de 300 ppm donne un % cumulé moyen de germination meilleur que celui des traités avec 100 et 200 ppm qui sont confondants, suivi de celui de 400 ppm. Pour le traitement au Cr, les pourcentages cumulés moyens de germination sont confondants pour les 4 concentrations appliquées dès le 10^{ème} jour, beaucoup plus tôt que ce qui a été observé dans le cas du traitement au Zn.

Les pourcentages finaux de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. donnent un aperçu global sur les effets des deux traitements, respectivement au Zn et au Cr, appliqués en utilisant différentes concentrations (**Tab. 3**) :

Tableau 3 : Evolution des pourcentages finaux de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. sous les effets des différentes concentrations en ZnSO₄ ou en K₂Cr₂O₇.

	Pourcentages finaux de germination				
	Témoins	[100 ppm]	[200 ppm]	[300 ppm]	[400 ppm]
ZnSO ₄	89,2	89,33	89,33	98,66	82,66
K ₂ Cr ₂ O ₇		93,33	94,66	84,0	82,66
Rapport	1	0,95	0,94	1,17	1

(1) si la capacité de germination au final des graines de *Lavandula stoechas* L. est de 89,2 % chez les graines témoins. Elle ne semble pas évoluer lorsque le zinc est apporté aux concentrations de 100 (89,3%) et 200 (89,3%) ppm. Cette capacité de germination au final augmente en revanche, lorsqu'on utilise aux mêmes concentrations le Cr, puisque elle culmine au final autour de 93,3% lorsque le traitement est de 100 ppm, et autour de 94,6% lorsque le traitement est de 200 ppm ;

(2) Le traitement au Zn d'une concentration de 300 ppm rehausse la germination des graines plus que les tous les autres traitements appliqués et plus que les graines témoins, étant donné que la capacité germinative atteinte au 20^{ème} jour des expérimentations est de l'ordre de 98,6% ;

(3) Les concentrations de 300 ppm en Cr et 400 ppm en Cr et en Zn sont préjudiciables aux graines de la lavande, puisque les % de germination finaux obtenus se trouvent réduits de façon conséquente : 84,0% pour le Cr appliqué à la concentration de 300 ppm et 82,6% pour respectivement le Cr et le Zn appliqués à la concentration de 400 ppm.

La vitesse de germination des graines de la lavande papillon a été caractérisée en calculant les temps moyens de germination pour les deux traitements appliqués et pour l'ensemble des concentrations utilisées (**Tab. 4**) :

Tableau 4 : Evolution des temps moyens de germination des graines de *Lavandula stoechas* L. sous les effets des différentes concentrations en ZnSO₄ ou en K₂Cr₂O₇.

	Temps moyens de germination en jours				
	Témoins	[100 ppm]	[200 ppm]	[300 ppm]	[400 ppm]
ZnSO ₄	6,8	6,15	7,23	7,75	8,68
K ₂ Cr ₂ O ₇		5,56	6,36	7,11	8,87
Rapport	1	1,10	1,13	1,09	0,97

(1) avec l'accroissement de la concentration de l'agent traitant [100 ; 200 ; 300 et 400 ppm], le temps moyen de germination ne fait qu'augmenter et ce pour le traitement au Zn comme pour le traitement au Cr ;

(2) le traitement au Zn de 100 ppm montre un temps moyen de germination plus faible que celui des graines témoins. C'est aussi le cas pour le traitement au Cr, qui montre un temps moyen de germination plus court pour la concentration de 100 ppm, qui s'étend même pour la concentration de 200 ppm ;

(3) les rapports des temps moyens de germination calculés sont tous proches de la valeur 1 référencée comme témoin, et ce quel que soit la concentration appliquée. Ces rapports indiquent que comparativement aux témoins, une progression identique des temps moyens de germination autant pour le traitement appliqué avec Zn, que le traitement appliqué avec le Cr.

IV.1.2. Résultats relatifs au statut de l'eau des plantules

IV.1.2.1. Poids frais des lots de plantules résultants des divers traitements

Une plantule de *L. stoechas* L. récupérée au bout des 20 jours du suivi de la germination présente un poids frais moyen de 7,2 mg. Les plantules issues du traitement des graines au Zn montrent un poids frais moyen qui ne fait que baisser avec l'augmentation de la concentration de l'agent traitant. Il n'est que de 6,33 mg par plantule lorsque la concentration appliquée est de 100 ppm ; 4,98 mg par plantule lorsque la concentration appliquée est de 200 ppm ; 4,34 mg par plantule lorsque la concentration appliquée est de 300 ppm et de 3,42 mg par plantule lorsque la concentration appliquée est de 400 ppm (Fig. 26).

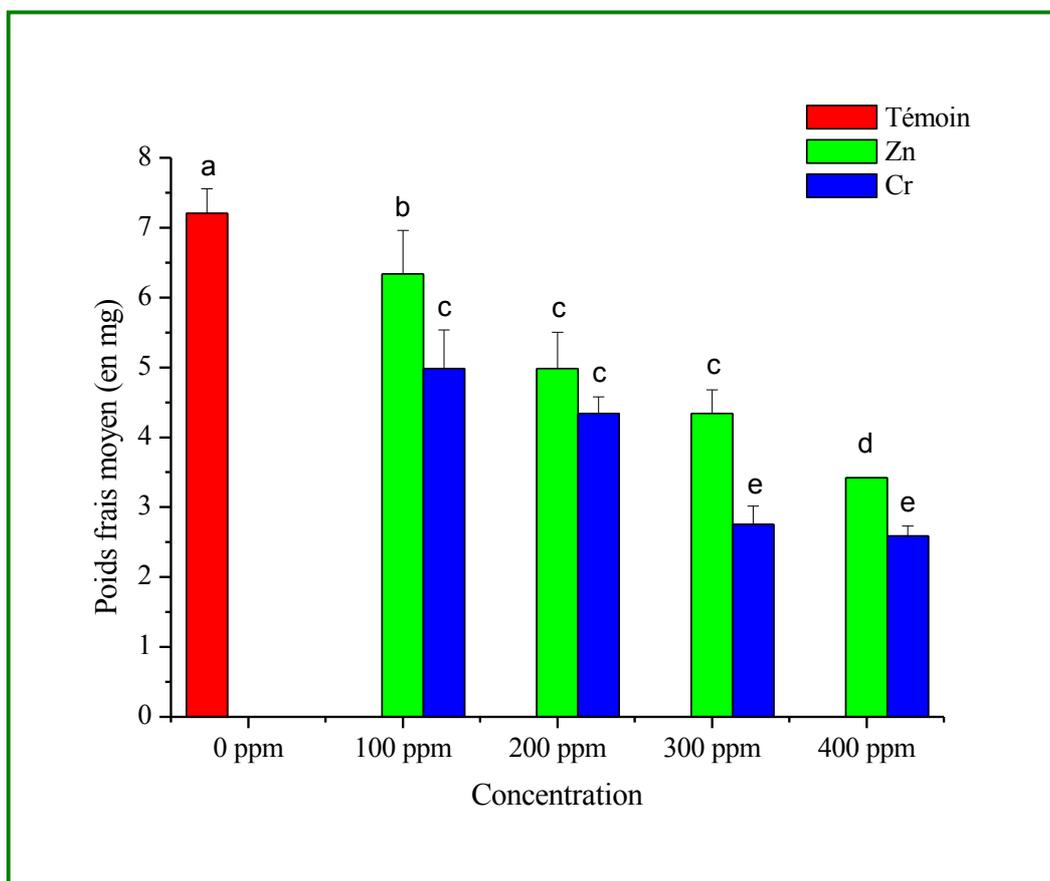


Figure 26 : Evolution des poids frais moyens par jeune plantule de *Lavandula stoechas* L. en fonction des différentes concentrations en $ZnSO_4$ et en $K_2Cr_2O_7$ appliquées lors de la germination des graines. Les différentes lettres indiquent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$.

C'est ce qui est également observé avec des applications de Cr, puisque la baisse enregistrée est plus grande que celle observée dans le cas du Zn. En effet, chacune des plantules présente un poids frais moyen de 4,98 mg seulement lorsque la concentration appliquée est de 100 ppm ; de 4,33 mg lorsque la concentration appliquée est de 200 ppm ; de 2,75 mg lorsque la concentration appliquée est de 300 ppm et de 2,58 mg lorsque la concentration appliquée est de 400 ppm (Fig. 26).

IV.1.2.2. Poids secs des lots de plantules résultants des divers traitements

La mesure du poids sec moyen d'une plantule témoin de *L. stoechas* L. est de 0,24 mg. Les plantules issues du traitement des graines avec le Zn exhibent un poids sec moyen équivalent à celui des témoins, particulièrement aux concentrations appliquées de 100, 200 et 300 ppm. En revanche, le traitement de 400 ppm donne des plantules avec un poids sec moyen significativement plus élevé, de l'ordre de 0,34 mg (Fig. 27).

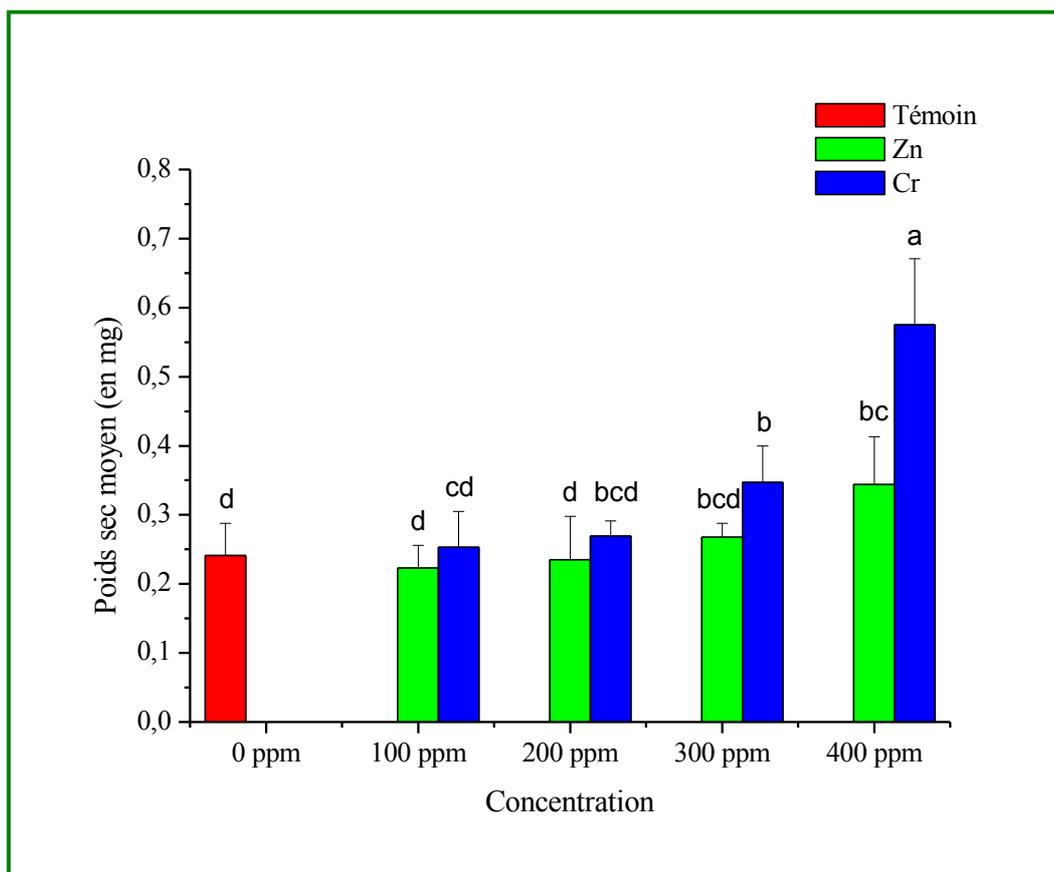


Figure 27 : Evolution des poids secs moyens par jeune plantule de *Lavandula stoechas* L. en fonction des différentes concentrations en $ZnSO_4$ et en $K_2Cr_2O_7$ appliquées lors de la germination des graines. Les différentes lettres indiquent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$

Avec le traitement de 100 et 200 ppm au Cr, les mesures par plantule des poids secs sont identiques à ceux des témoins. La différence est notable pour la concentration de 300 ppm où le poids sec par plantule enregistré est de 0,34 mg, encore plus notable pour la concentration de 400 ppm où le poids sec par plantule obtenu est de 0,57 mg (Fig. 27).

IV.1.2.3. Teneur en eau des lots de plantules résultants des divers traitements

En déterminant la teneur en eau moyenne par plantule témoin de *L. stoechas* L., on trouve qu'elle culmine autour de 96,62%. Celle des traités par le Zn ne diffère pas de celle des témoins, et ce pour des applications de 100 (96,44%), 200 (95,14%) et 300 (93,80%) ppm en Zn. Par contre, le traitement de 400 ppm en Zn, fait diminuer significativement cette teneur en eau, de l'ordre de 89,83% (Fig. 28).

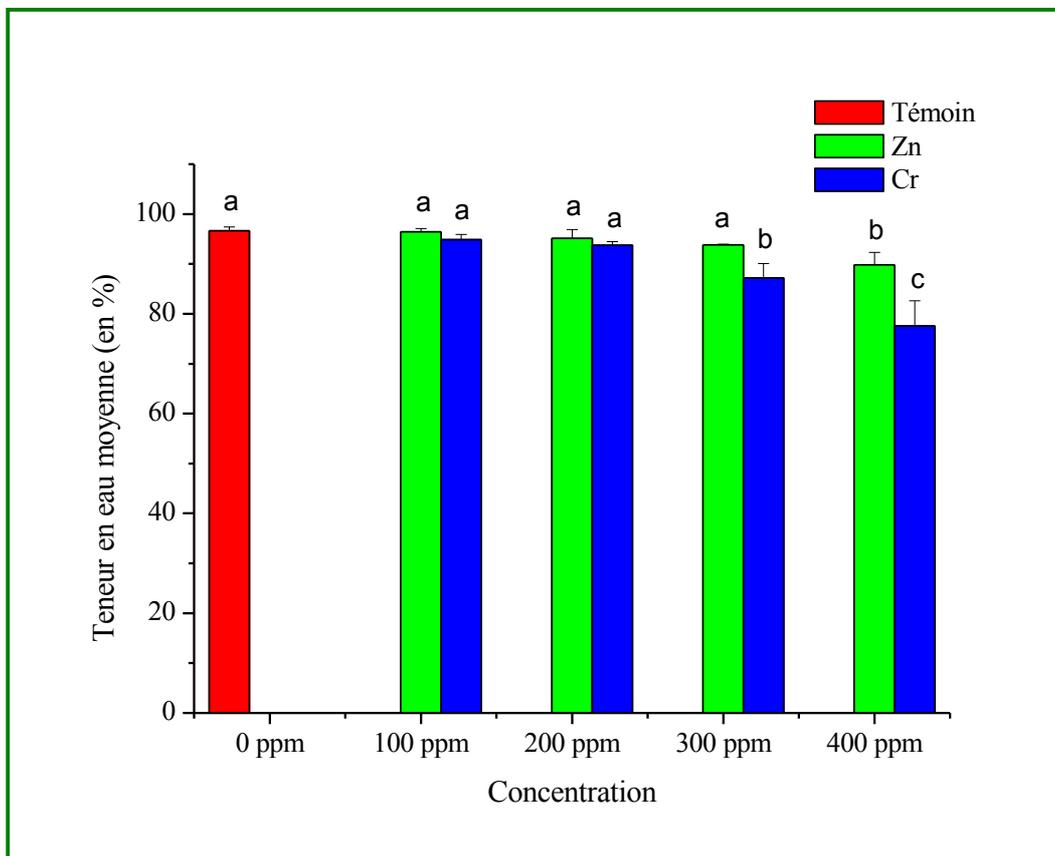


Figure 28 : Evolution des teneurs en eau moyennes par jeune plantule de *Lavandula stoechas* L. en fonction des différentes concentrations en $ZnSO_4$ et en $K_2Cr_2O_7$ appliquées lors de la germination des graines. Les différentes lettres indiquent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$

Avec des applications en Cr, les concentrations de 100 (94,89%) et 200 (93,76%) ppm donnent les mêmes teneurs en eau que les plantules témoins (96,62%). La diminution est notable pour la concentration de 300 (87,20%) ppm ; et beaucoup plus pour la concentration de 400 ppm où la teneur en eau enregistrée est de 77,55% (Fig. 28).

IV.1.2.4. Comparatif entre les lots de plantules résultants des divers traitements

Par rapport au poids frais de chacune des plantules de *Lavandula stoechas* L., résultat d'un traitement préalable des graines par différentes concentrations en Zn / Cr, on constate (Tab. 5) :

Tableau 5 : Poids frais mesurés des plantules de *Lavandula stoechas* L. issues des traitements appliqués aux graines par les différentes concentrations en ZnSO₄ / K₂Cr₂O₇.

	Poids frais moyens des plantules (mg)				
	Témoins	[100 ppm]	[200 ppm]	[300 ppm]	[400 ppm]
ZnSO ₄	7,20	6,33	4,98	4,34	3,42
K ₂ Cr ₂ O ₇		4,98	4,33	2,75	2,58
Rapport	1	1,27	1,15	1,57	1,32

(1) une application de 100 ppm en Zn est seule à maintenir le poids frais des plantules à un niveau assez appréciable, proche de celui des témoins. Les autres concentrations en Zn ou en Cr tendent à diminuer ce poids frais ;

(2) une application de 100 ppm en Cr tend à diminuer un peu plus le poids frais des plantules que la même application en Zn. Il faut en revanche, une application de 200 ppm et même 300 ppm en Zn pour avoir la même incidence sur le poids frais des plantules que le Cr administré à 100 sinon 200 ppm ;

(3) une application de 400 ppm en Zn fait diminuer sensiblement le poids frais des plantules. Ce niveau de diminution est atteint avec une application de seulement 300 ppm en Cr. Une application de 400 ppm en Cr réduit de façon drastique le poids frais des plantules ;

(4) le rapport ZnSO₄ / K₂Cr₂O₇ dans tous les cas de figure est supérieur à 1, favorable au Zn par rapport au Cr, notamment en ce qui concerne l'application de 300 ppm.

Le poids sec mesuré pour chacune des plantules de *Lavandula stoechas* L. donne quelques enseignements que l'on résume ainsi (**Tab. 6**) :

Tableau 6 : Poids secs mesurés des plantules de *Lavandula stoechas* L. issues des traitements appliqués aux graines par les différentes concentrations en $ZnSO_4$ / $K_2Cr_2O_7$.

	Poids secs moyens des plantules (mg)				
	Témoins	[100 ppm]	[200 ppm]	[300 ppm]	[400 ppm]
ZnSO ₄	0,24	0,22	0,23	0,26	0,34
K ₂ Cr ₂ O ₇		0,25	0,26	0,34	0,57
Rapport	1	0,88	0,88	0,76	0,59

(1) le traitement de 100 ou bien 200 ppm en Zn donnent le même poids sec que les traitements de 100 et 200 ppm en Cr. Le rapport est identique dans les 2 cas de figure ;

(2) le traitement de 300 ppm en Zn ne change pas substantiellement le poids sec des plantules lorsqu'on le compare aux 2 premiers traitements de 100 et 200 ppm, que ce soit avec le Zn ou avec le Cr. En revanche, le traitement de 300 ppm en Cr augmente la matière sèche des plantules. Ceci dit, il faut une concentration de 400 ppm en Zn pour égaler le niveau du poids sec obtenu avec la concentration de 300 ppm en Cr ;

(3) avec la réduction drastique du poids frais des plantules avec le traitement de 400 ppm en Cr, en contrepartie le poids sec augmente. C'est le niveau le plus élevé enregistré parmi tous les essais. Ceci se traduit de façon conséquente sur le rapport Zn / Cr.

La teneur en eau a été déterminée en exploitant les mesures des poids frais et secs de chacune des plantules de *Lavandula stoechas* L. issues des différents traitements appliqués au préalable aux graines par les deux métaux lourds, Zn et Cr. Les résultats obtenus confortent les constatations auparavant déduites (**Tab. 7**) :

(1) que ce soit le traitement de 100 ou bien 200 ppm en Zn ou bien en Cr, le rapport obtenu est de 1. Autrement, les deux traitements appliqués au préalable aux graines sont sans incidence notable sur la teneur en eau des plantules qui en sont issues ;

(2) le traitement de 300 ppm en Zn ne change pas le contenu en eau des plantules. Par contre l'application du Cr à 300 ppm diminue la teneur en eau, ce qui se traduit par un rapport Zn / Cr qui tend à augmenter ;

(3) le contenu en eau des plantules change avec la concentration de 400 ppm en Zn, de même niveau que celle de 300 ppm en Cr. En revanche, la diminution de la teneur en eau avec la concentration de 400 ppm en Cr est assez conséquente. Elle traduit un effet négatif sur l'état des plantules obtenu.

Tableau 7 : Teneur en eau des plantules de *Lavandula stoechas* L. issues des traitements appliqués aux graines par les différentes concentrations en ZnSO₄ / K₂Cr₂O₇.

	Teneur en eau moyenne des plantules (%)				
	Témoins	[100 ppm]	[200 ppm]	[300 ppm]	[400 ppm]
ZnSO ₄	96,62	96,44	95,14	93,80	89,83
K ₂ Cr ₂ O ₇		94,89	93,76	87,20	77,55
Rapport	1	1,01	1,01	1,07	1,15

IV.1.3. Résultats relatifs aux mesures biométriques

IV.1.3.1. Partie racinaire des lots de plantules résultants des divers traitements

Les plantules récupérées 20 jours après la germination des graines sous une contrainte métallique ont été mesurées et comparées aux plantules témoins issues des germinations sans agent métallique. La longueur mesurée moyenne de la partie racinaire par plantule témoin est de 3,87 cm. Celle des plantules issues du traitement au Zn est inférieure à celle des témoins. Elle ne fait que diminuer au fur et à mesure que l'on augmente la concentration de l'agent traitant. En effet, la taille des plantules issues d'une application de 100 ppm en Zn est de 3,09 cm, soit de près de 1 cm de diminution. Elles diminuent encore de 1 cm lorsqu'on applique une concentration de 200 ppm (2,08 cm), de 0,42 cm lorsqu'on applique une concentration de 300 ppm (1,56 cm) et de 0,48 cm lorsqu'on applique une concentration de 400 ppm (1,08 cm) (**Fig. 29**).

Avec des applications de Cr, les longueurs racinaires sont encore plus affectées que les applications au Zn. En effet, la longueur de la racine de chacune des plantules est de seulement 2,25 cm lorsque la concentration appliquée est de 100 ppm ; de 1,74 cm lorsque la concentration appliquée est de 200 ppm ; de 0,84 cm lorsque la concentration appliquée est de 300 ppm et de 0,19 cm lorsque la concentration appliquée est de 400 ppm (**Fig. 29**).

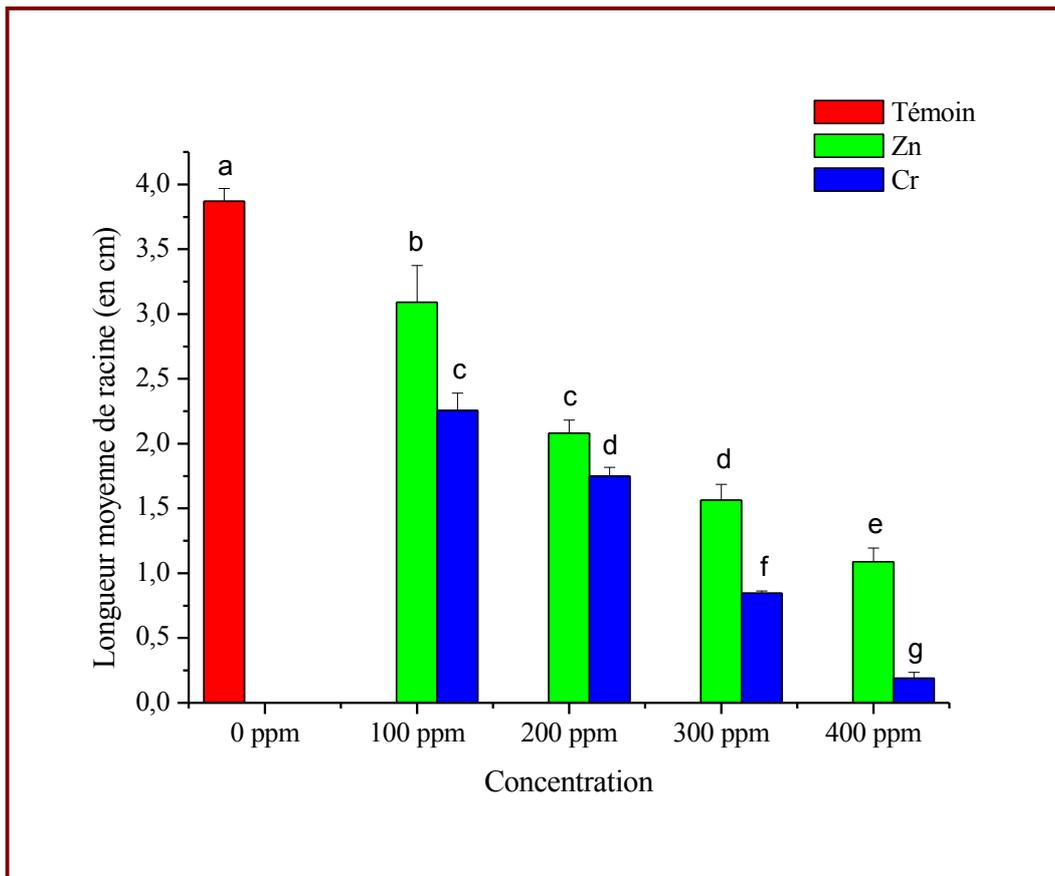


Figure 29 : Evolution des longueurs moyennes des racines par jeune plantule de *Lavandula stoechas* L. en fonction des différentes concentrations en $ZnSO_4$ et en $K_2Cr_2O_7$ appliquées lors de la germination des graines. Les différentes lettres indiquent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$

IV.1.3.2. Partie aérienne des lots de plantules résultants des divers traitements

La mesure de la partie aérienne des plantules a été la plus délicate en raison de l'accroissement peu important de cette partie.

La longueur moyenne de la partie aérienne d'une plantule témoin de *L. stoechas* L. est de 0,17 cm. Les plantules issues du traitement des graines par le Zn, présentent une longueur moyenne de leur partie aérienne statistiquement identique à celle des témoins, et ce pour l'ensemble des concentrations appliquées : 100, 200, 300 et 400 ppm.

Lorsqu'on utilise le Cr, l'ensemble des traitements appliqués donnent également, au même titre que le traitement en Zn, les mêmes longueurs moyennes des parties aériennes pour des applications de 100, 200, 300 et 400 ppm (**Fig. 30**).

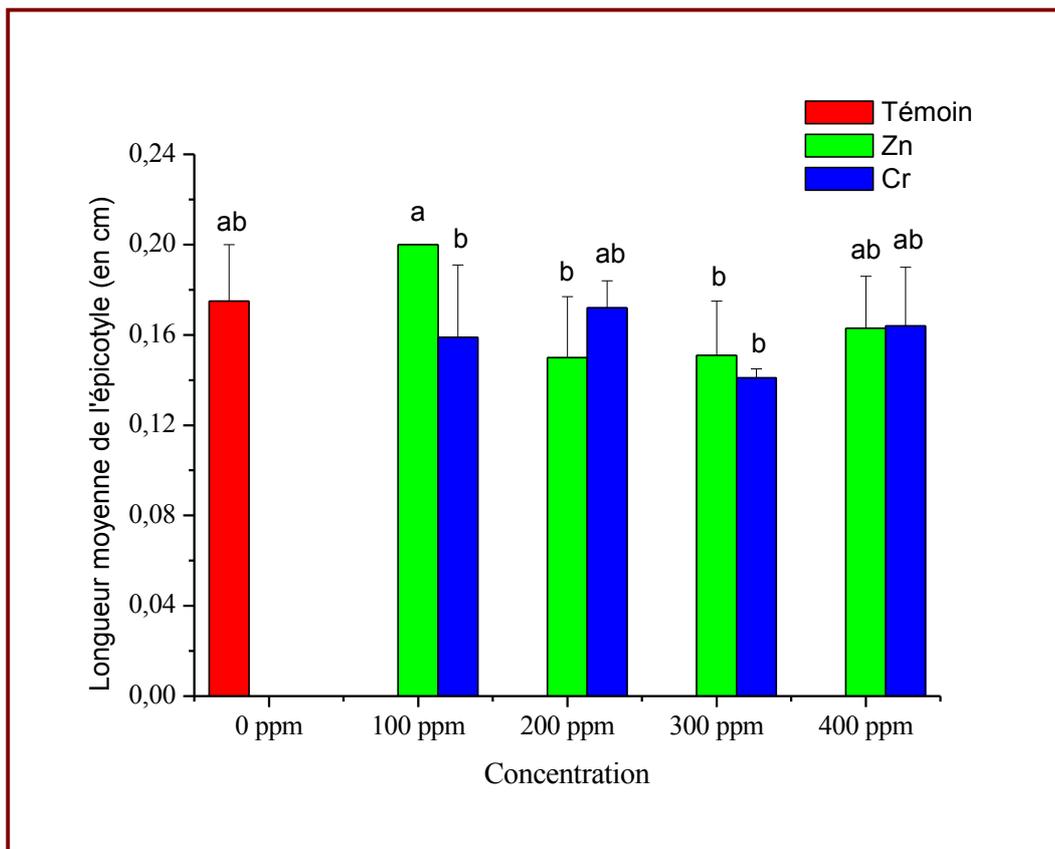


Figure 30 : Evolution des longueurs moyennes des parties aériennes par jeune plantule de *Lavandula stoechas* L. en fonction des différentes concentrations en $ZnSO_4$ et en $K_2Cr_2O_7$ appliquées lors de la germination des graines. Les différentes lettres indiquent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$

IV.1.3.3. Comparatif entre les lots de plantules résultants des divers traitements

Par rapport à la longueur racinaire de chacune des plantules de *Lavandula stoechas* L., résultat d'un traitement préalable des graines par différentes concentrations en Zn / Cr, on constate (**Tab. 8**) :

(1) pour toutes les concentrations analysées, la partie racinaire des plantules issues du traitement au Zn sont plus longues comparativement à la longueur racinaire des plantules issues d'un traitement préalable au Cr, comme en témoigne le rapport Zn / Cr toujours supérieur à 1 ;

(2) le traitement en Zn de 200 ppm engendre significativement la même longueur racinaire que le traitement en Cr de 100 ppm. C'est aussi le cas pour le traitement en Zn de

300 ppm qui donne significativement la même longueur racinaire que le traitement en Cr de 200 ppm ;

(3) une application de 400 ppm en Zn fait diminuer sensiblement la longueur racinaire des plantules, beaucoup plus lorsqu'il s'agit du Cr à la même concentration, qui est fort préjudiciable au développement de la racine.

Tableau 8 : Longueur de la partie racinaire des plantules de *Lavandula stoechas* L. issues des traitements appliqués aux graines par les différentes concentrations en ZnSO₄ / K₂Cr₂O₇.

	Longueur de la partie racinaire (cm)				
	Témoins	[100 ppm]	[200 ppm]	[300 ppm]	[400 ppm]
ZnSO ₄	3,87	3,09	2,08	1,56	1,08
K ₂ Cr ₂ O ₇		2,25	1,74	0,84	0,19
Rapport	1	1,37	1,19	1,85	5,68

Pour ce qui est des mesures réalisées sur les parties aériennes et hormis la mesure relative à l'application de 100 ppm en Zn, toutes les autres mesures n'ont pas permis de faire la distinction entre l'influence du Zn ou bien du Cr sur le paramètre longueur des racines. En effet, les valeurs obtenues sont significativement identiques entre elles pour l'ensemble des concentrations testées et par rapport à la valeur des témoins, en témoigne le rapport Zn / Cr qui est sensiblement égal à la valeur 1 (**Tab. 9**).

Tableau 9 : Longueur de la partie aérienne des plantules de *Lavandula stoechas* L. issues des traitements appliqués aux graines par les différentes concentrations en ZnSO₄ / K₂Cr₂O₇.

	Longueur de la partie aérienne (cm)				
	Témoins	[100 ppm]	[200 ppm]	[300 ppm]	[400 ppm]
ZnSO ₄	0,175	0,200	0,150	0,151	0,163
K ₂ Cr ₂ O ₇		0,159	0,172	0,141	0,164
Rapport	1	1,25	0,87	1,07	0,99

IV.1.4. Résultats relatifs à la quantification de la proline

IV.1.4.1. Proline I des lots de plantules résultants des divers traitements

La proline a été tout d'abord quantifiée en mg/g de poids frais au sein des plantules récupérées 20 jours après la germination des graines, qu'elles soient témoins ou bien auxquelles on a imposé un stress métallique par le Zn ou le Cr à différentes concentrations. La proline des plantules témoins est de 1,43 mg/g de PF. Celle des plantules issues du traitement au Zn est supérieure à celle des témoins lorsque la concentration appliquée est de 100 ppm (1,82 mg/g de PF). Elle décline aux applications de 200, 300 et 400 ppm pour tourner autour respectivement de 1,05 ; 1,16 et 1,06 mg/g de PF. Ces 3 valeurs moyennes enregistrées sont statistiquement identiques entre elles, mais bien inférieures à celle des témoins et des traités par la concentration de 100 ppm en Zn (**Fig. 31**).

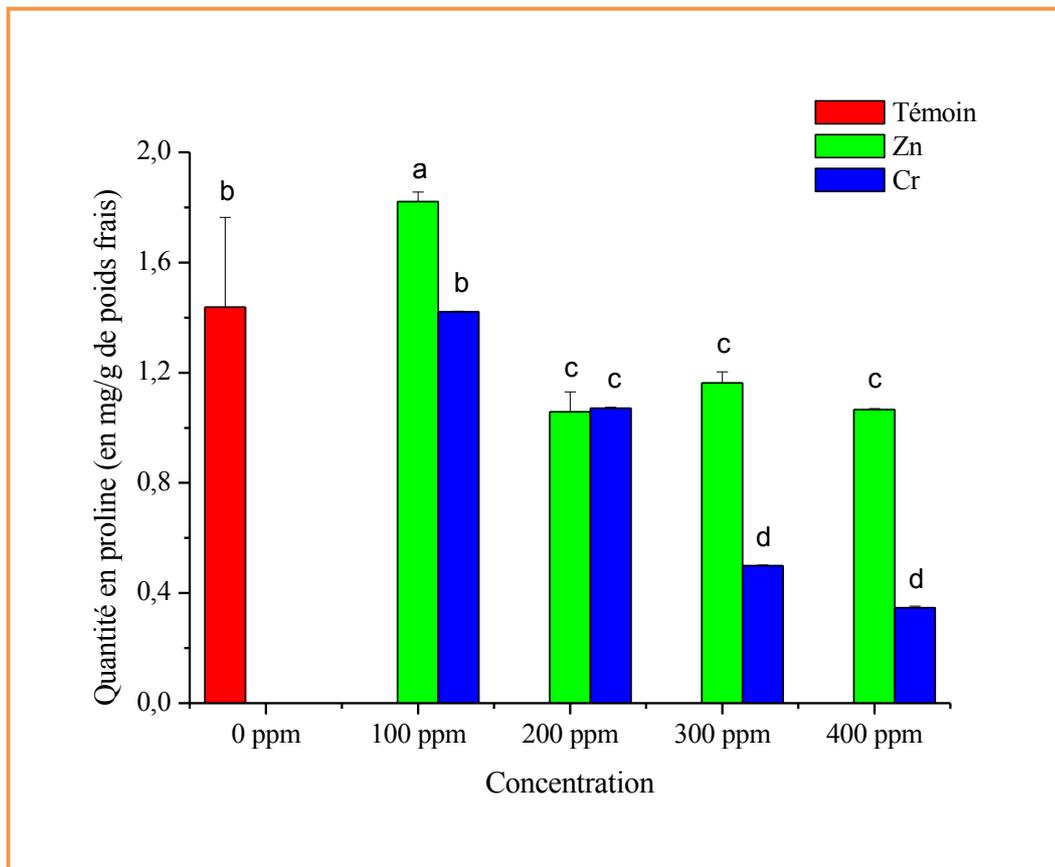


Figure 31 : Evolution des quantités en proline (exprimées en mg/g de poids frais) par jeune plantule de *Lavandula stoechas* L. en fonction des différentes concentrations en $ZnSO_4$ et en $K_2Cr_2O_7$ appliquées lors de la germination des graines. Les différentes lettres indiquent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$

Avec le Cr, la quantité en proline est de même niveau que celle des témoins (1,43 mg/g de PF) lorsque l'application est de 100 ppm seulement (1,42 mg/g de PF). Elle décline une première fois, de 1,42 à 1,07 mg/g de PF lorsqu'on porte l'application à 200 ppm ; puis une seconde fois, de 1,07 à 0,49 mg/g de PF, lorsqu'on porte l'application à 300 ppm. L'application de 400 ppm ne fait pas diminuer autant la proline (0,34 mg/g de PF), puisqu'elle reste statistiquement de même niveau que celle des traités par la concentration de 300 ppm (**Fig. 31**).

IV.1.4.2. Proline II des lots de plantules résultants des divers traitements

La quantité de la proline rapportée en mg/100 mg de poids sec ne change pas trop de la précédente. La proline des témoins passe à 4,22 mg/100 mg de PS (**Fig. 32**).

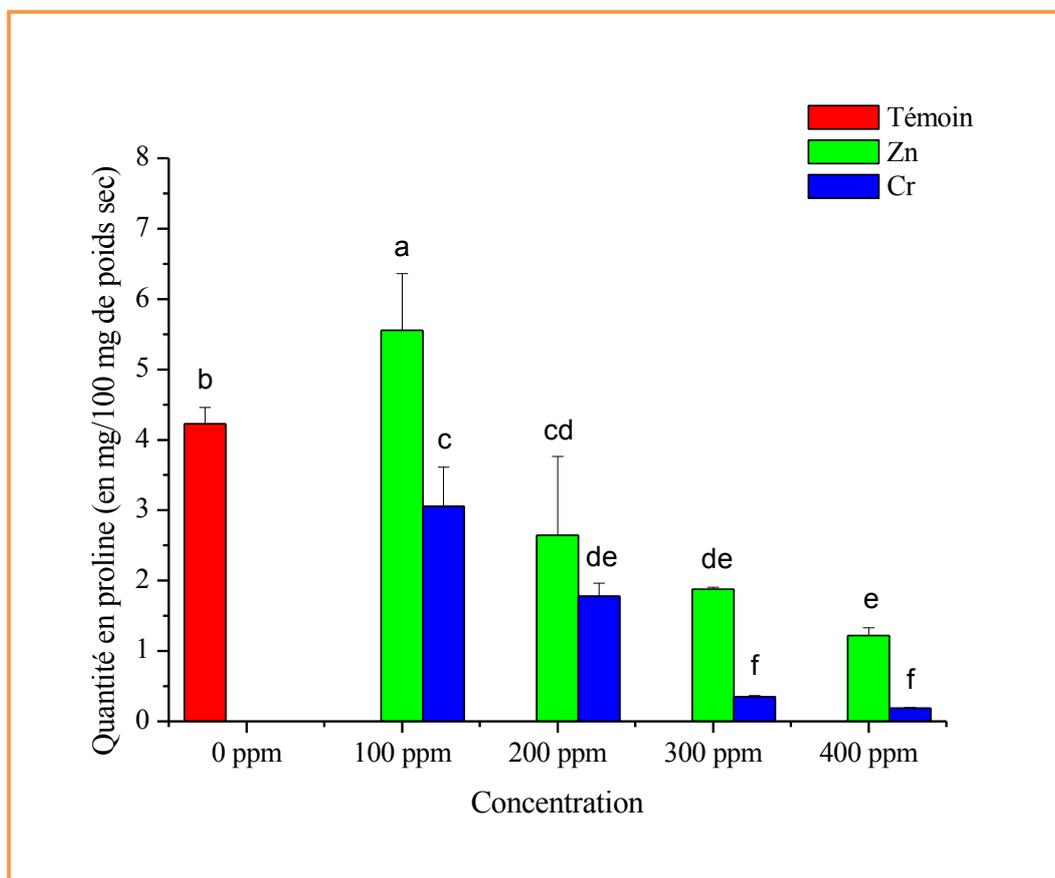


Figure 32 : Evolution des quantités en proline (exprimées en mg/100 mg de poids sec) par jeune plantule de *Lavandula stoechas* L. en fonction des différentes concentrations en $ZnSO_4$ et en $K_2Cr_2O_7$ appliquées lors de la germination des graines. Les différentes lettres indiquent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$

Celle des traitées au Zn est supérieure de celle des témoins pour seulement la concentration de 100 ppm (5,55 mg/100 mg de PS). Elle décline en revanche progressivement pour les 3 autres concentrations qui suivent : de 5,55 à 2,64 mg/100 mg de PS pour une application de 200 ppm ; de 2,64 à 1,87 mg/100 mg de PS pour une application de 300 ppm et de 1,87 à 1,21 mg/100 mg de PS pour une application de 400 ppm (**Fig. 32**).

Avec le Cr, la quantité en proline n'est pas cette fois-ci de même niveau que celle des témoins (4,22 mg/100 mg de PS) lorsque l'application est de 100 ppm (3,05 mg/100 mg de PS). Elle décline également à 1,77 mg/100 mg de PS lorsqu'on porte l'application à 200 ppm, à 0,34 mg/100 mg de PS lorsqu'on porte l'application à 300 ppm, puis à 0,18 mg/100 mg de PS lorsqu'on porte l'application à 400 ppm (**Fig. 32**).

IV.1.4.3. Comparatif entre les lots de plantules résultants des divers traitements

En quantifiant la proline de chacune des plantules de *Lavandula stoechas* L. issues d'un traitement préalable des graines par différentes concentrations en Zn / Cr, on remarque (**Tab. 10**) :

Tableau 10 : Quantité en proline (exprimée en mg/g de poids frais) des plantules de *Lavandula stoechas* L. issues des traitements appliqués aux graines par les différentes concentrations en ZnSO₄ / K₂Cr₂O₇.

	Quantité en proline (mg/g de poids frais)				
	Témoins	[100 ppm]	[200 ppm]	[300 ppm]	[400 ppm]
ZnSO ₄	1,438	1,821	1,058	1,163	1,066
K ₂ Cr ₂ O ₇		1,421	1,071	0,499	0,347
Rapport	1	1,28	0,98	2,33	3,07

(I) une quantité importante en proline caractérise uniquement les plantules issues d'une application préalable au Zn de 100 ppm. La même application en Cr de 100 ppm ne modifie pas le contenu en proline des plantules qui en sont issues, puisque c'est le même contenu retrouvé au sein des plantules témoins ;

(2) un application de 200 ppm en Zn fait diminuer le contenu en proline des plantules, beaucoup plus que celui d'une application avec la même concentration en Cr, au point où le rapport Zn / Cr revient à sa valeur de départ qui est de 1 ;

(3) les applications les plus fortes en Zn (300 et 400 ppm) ne font plus diminuer le contenu en proline, qui se stabilise autour de la quantité moyenne enregistrée avec l'application de 200 ppm. Ceci, ne s'applique pas pour le Cr, dont le contenu en proline diminue de moitié lorsque l'application est de 300 ppm, un peu plus lorsque l'application est de 400 ppm. Le rapport Zn / Cr ne fait qu'augmenter, passant à 2,33 puis à 3,07.

En quantifiant la proline rapportée cette fois-ci au poids sec, les mêmes constatations reviennent pour ce qui est de l'expression de la quantité en proline selon le poids frais des plantules. Sinon deux autres observations peuvent être rajoutées (**Tab. 11**) :

(1) la quantité en proline ne fait que diminuer avec l'augmentation de la concentration des applications en Zn et ce pour 200, 300 et 400 ppm. Pour les applications en Cr, la quantité en proline ne fait que diminuer depuis la concentration de 100 à la concentration de 400 ppm ;

(2) la valeur du rapport Zn / Cr pour l'application de 200 ppm n'est plus de 1 comme dans le premier cas, il passe à une valeur de 1,48. Ceci indique que les quantités en proline rapportées au poids frais étaient équivalentes pour des applications de 200 ppm en Zn et en Cr. Par rapport au poids sec, les diminutions enregistrées dans les 2 cas sont plus accentuées dans le cas du traitement au Cr que dans le cas du traitement au Zn.

Tableau 11 : Quantité en proline (exprimée en mg/100 mg de poids sec) des plantules de *Lavandula stoechas* L. issues des traitements appliqués aux graines par les différentes concentrations en ZnSO₄ / K₂Cr₂O₇.

	Quantité en proline (mg/100 mg de poids sec)				
	Témoins	[100 ppm]	[200 ppm]	[300 ppm]	[400 ppm]
ZnSO ₄	4,225	5,554	2,643	1,876	1,219
K ₂ Cr ₂ O ₇		3,055	1,777	0,347	0,184
Rapport	1	1,81	1,48	5,40	6,62

IV.2. Discussion

IV.2.1. Discussion relative à la germination

La germination est une étape importante dans le cycle de développement des végétaux. Nous avons au cours de notre étude, assuré le suivi de la germination des graines d'une espèce comme *Lavandula stoechas*, qu'on retrouve naturellement dans nos régions.

De ce suivi, il a été remarqué que la capacité de germination atteinte au final des graines témoins est de 89,2% pour un temps moyen de germination de 6,8 jours. Nos conditions de travail basés sur un choix des graines de saison et une température de travail de 20°, nous ont permis d'atteindre cette capacité germinative au final, d'autant que les graines d'une espèce apparentée, *Lavandula angustifolia*, ne germent qu'à hauteur de 33 % (**Demirkaya et al. 2017**).

En testant le Zn apporté à différentes concentrations, sur la germination des graines de *L. stoechas*, il a été remarqué que les concentrations de 100 et 200 ppm sans améliorer le pouvoir germinatif des graines, donnent les mêmes pourcentages de germination au final que les graines témoins. Seulement, une différence a été observée au cours des premiers jours de la germination, qui paraît plus accélérée pour les 2 traités par le Zn que les témoins, notamment entre le 4^{ème} et le 6^{ème} jour. Ceci est d'autant vrai que le temps moyen de germination enregistré est légèrement inférieur à celui des témoins (6,15 jours vs 6,8 jours), particulièrement pour la concentration de 100 ppm en Zn.

La concentration de 300 ppm stimule la germination des graines, donnant un pourcentage de germination au final meilleur que celui des témoins, proche de la germination de toutes les graines testées (98,66%), pour un temps moyen de germination cependant un peu plus long (7,75 jours). La stimulation de la germination constatée dans ce cas de figure ne se poursuit pas lorsqu'on porte la concentration du Zn à 400 ppm, qui fait baisser notablement la capacité de germination au final des graines (82,66%) pour un temps moyen de germination encore plus long.

Avec le Cr, les effets sont sensiblement différents par rapport au Zn, puisque les pourcentages finaux de germination atteints sont encore meilleurs pour les deux concentrations de 100 et 200 ppm (de 93 à 95%), avec des temps moyens de germination plus courts par rapport aux témoins. Les concentrations de 300 et 400 ppm en Cr limitent en revanche la germination des graines et allongent les temps moyens de germination.

Dans une étude consacrée aux effets du Cr sur le pouvoir germinatif des graines de *Parkinsonia aculeata* L., il a été observé que la capacité de germination marque une diminution. Cette diminution est fonction de la concentration de l'agent métallique, qui plus en augmentant, donne moins de graines qui germent au final. A titre indicatif, les pourcentages cumulés moyens de germination obtenus à la fin des expérimentations sont de 63,3% pour une concentration de 25 ppm ; de 56,6% pour une concentration de 50 ppm ; de 45,5% pour une concentration de 150 ppm ; de 10% pour une concentration de 300 ppm ; de 7,8% pour une concentration de 450 ppm et de 4,4% pour une concentration de 600 ppm. Il y a lieu de noter que le pourcentage de germination des graines témoins est de 70,5% (**Adjaoute et Bouchal, 2017**).

Le pourcentage de germination des graines tend vers une diminution, qu'on peut expliquer par le fait que les métaux lourds peuvent affecter la germination de la graine en limitant l'approvisionnement en eau (stress osmotique) et/ou en provoquant des toxicités spécifiques d'ions (stress ionique) (**Khan, 2002**).

Le temps moyen de germination des graines de *L. stoechas* L., qui exprime la vitesse de germination, n'augmente qu'avec l'élévation de la concentration du traitement. C'est ce qui a été obtenu pour les graines de *Parkinsonia aculeata* L., traitées avec des concentrations croissantes en Cr. En effet, si le temps moyen de germination des graines témoins n'est que de 1,5 jours, celui des traités dépasse 5 jours (**Adjaoute et Bouchal, 2017**). Dans une autre étude consacrée aux effets du Cr chez cinq variétés de blé, il a été constaté un allongement de la phase de latence et une augmentation de la période de l'extrusion, correspondant à l'émergence de la racicule (**Datta et al., 2011**).

Que ce soit pour le Zn ou le Cr, la capacité germinative des graines est assez importante notamment pour le Zn jusqu'à 300 ppm, pendant que le Cr ne fait diminuer cette capacité qu'à partir de la concentration de 300 ppm, alors que les concentrations de 100 et 200 ppm semblent plus stimuler cette capacité germinative. La concentration la plus forte de 400 ppm fait diminuer la capacité germinative des graines, mais les pourcentages cumulés finaux obtenus restent cependant assez appréciables, à hauteur de 82%. Pour **Kranner & Colville (2011)**, qui résumant plusieurs travaux consacrés aux impacts des métaux lourds sur de nombreuses fonctions physiologiques vitales des plantes et particulièrement sur la germination des graines, ces auteurs affirment qu'à de fortes concentrations les métaux lourds entraînent un déclin des capacités germinatives des espèces considérées, cependant cette capacité n'est jamais complètement inhibée.

De son côté, **Ernst (1998)** stipule que la germination, qui est un processus certes vulnérable au stress métallique, serait un mécanisme des plus résistants parmi les autres processus de croissance et de développement d'une plante. L'auteur explique que les téguments des graines constitueraient une barrière contre une forte accumulation des métaux.

Selon **Woolhouse (1983)**, ou encore **Fernandes & Henriques (1991)**, pour tout processus physiologique ou métabolique, ce sont les seuils critiques de phytotoxicité, définis en termes d'accumulation tissulaire, qui déterminent la sensibilité ou non aux métaux lourds. Ainsi et selon **Mihoub et al. (2005)**, la germination ne doit pas être considérée comme processus tolérant ou résistant aux métaux lourds ; la vulnérabilité de la germination devrait être associée aux niveaux d'accumulation réelle des métaux, qui interfèrent avec les voies métaboliques dans les tissus de la graine (**Fatarna et al. 2017**).

Les effets inhibiteurs des plus fortes concentrations pourraient être, en grande partie, expliqués par une action inhibitrice des métaux sur les enzymes hydrolytiques des réserves emmagasinées au sein des graines (**Chugh and Sawhney, 1996 ; Bansal et al. 2001**) et/ou amputés à des perturbations dans le métabolisme respiratoire (**Bansal and Sharma, 2000**). Seulement, l'inhibition semble dépendre du métal, de sa concentration, de la durée d'exposition des graines, de l'espèce végétale, voire même de la variété et de la graine, notamment la nature des ses téguments (**Carlson et al. 1991 ; Munzuroglu & Geckil, 2002**).

IV.2.2. Discussion relative au statut de l'eau

Lorsqu'on considère le statut de l'eau des plantules issues du traitement préalable des graines avec différentes concentrations en Zn ou bien en Cr, on note que les résultats obtenus reflètent aussi bien la capacité de germination obtenue au final et l'état hydrique des plantules qui en sont issues. Ainsi, la teneur en eau des prétraités au Zn reste de même niveau que celle des témoins et ce pour les 3 concentrations de 100, 200 et même 300 ppm. C'est pareil pour le prétraitement au Cr, mais avec seulement les 2 concentrations de 100 et 200 ppm. Le reste induit une baisse notable du contenu en eau des plantules.

La teneur en eau nous donne un aperçu sur l'état de turgescence relatif d'un tissu ou d'un organe et préfigure de l'état de tolérance ou non aux conditions environnantes. Cette tolérance peut être réalisée grâce à la capacité d'une plante à pouvoir mettre en place assez rapidement, des mécanismes qui lui assurent d'abord une absorption de l'eau, puis la

sauvegarde d'un certain niveau d'hydratation, seul garant de la continuité du métabolisme cellulaire (**Turner, 1986**).

Dans un travail qui s'est intéressé à la teneur relative en eau des deux premières feuilles du haricot, la culture hydroponique qui devait influencer négativement la rétention d'eau, s'est révélée positivement corrélée avec l'influence exercée par l'ajout d'un métal lourd ($K_2Cr_2O_7$), comme le Cr au milieu hydroponique à une concentration de 300 ppm. Ceci n'a été valable que pendant les 3 premières heures de la culture, le prolongement de la durée rompt cependant cet effet positif, suivi d'une perte d'eau drastique et irréversible (**Arroudj, 2019**).

Dans une autre étude réalisée sur des plants de *Vicia faba* L. auxquels on a appliqué des concentrations croissantes en cuivre, la teneur relative en eau diminue en fonction de l'intensité du stress métallique appliqué. Pour la concentration la plus forte appliquée de 1000 ppm, la teneur relative en eau descend jusqu'aux environs de 50% (**Cherief et Amrane, 2016**).

Les niveaux en eau obtenus chez les plantules de *L. stoechas* L. augurent déjà de niveau de l'absorption et de la réhydratation des graines, en dépit de la présence de concentrations croissantes en métaux lourds. L'ajout du Zn et du Cr n'a pas empêché l'imbibition des graines, puis leur germination, hormis pour les plus fortes concentrations.

Almansouri et al. (2001) expliquent que l'imbibition ne se réalise que si le potentiel hydrique de la graine doit être inférieur à celui du milieu de germination. Les téguments, une barrière entre l'embryon et son environnement, n'a pas empêché l'imbibition des graines, encore moins la perte d'eau au cours du processus de germination, ni réduit les échanges de l'eau entre les deux milieux aux premiers jours de la croissance des plantules (**Di Salvatore et al. 2008**).

Lefèvre et al. (2009) imputent l'effet inhibiteur de fortes concentrations de Zn sur la germination, et non pas sur l'imbibition, par le fait que ce métal induit ses effets après imbibition, autrement une fois en contact avec les cellules de l'embryon et des tissus qui l'entourent. En revanche, d'autres métaux comme le Cd, limite significativement la réhydratation des téguments, tout en réduisant par la suite le taux de germination et la croissance racinaire. C'est ce que constate **Lefèvre et al. (2009)** sur l'imbibition des graines de *Dorycnium pentphyllum* et sur leur germination.

IV.2.3. Discussion relative aux mesures biométriques

La germination se termine lorsque la radicule émerge des téguments de la graine (**Hopkins, 2003**). La croissance des parties racinaire et aérienne serait plus sensible à l'action toxique des métaux et est souvent complètement inhibée par de faibles concentrations qui ont peu d'effets sur la germination (**Mahmood et al. 2005 ; Aydinalp and Marinova, 2009 ; Kranner and Colville, 2011**).

Nos résultats obtenus à ce sujet montrent que le Zn fait diminuer la longueur des racines des plantules obtenues après les avoir traitées par différentes concentrations. La diminution ne fait qu'augmenter avec la concentration appliquée. Idem pour les longueurs racinaires mesurées sur les plantules issues des traitements au Cr. Ces longueurs diminuent encore plus en augmentant la concentration du Cr et comparativement au traitement imposé par le Zn.

C'est ce que trouve **Fatarna et al. (2017)** chez *Atriplex halimus* L., dont les graines ont été impactées de point de vue longueur racinaire, après leurs traitements au Cd, Zn et Pb. En effet, les métaux utilisés réduisent significativement la croissance des racicules. Cette réduction est d'autant plus prononcée que les concentrations sont élevées. Les réductions des longueurs enregistrées à la fin de l'expérimentation, par rapport au témoin, sont de l'ordre de 67% suite à l'ajout du zinc et de plomb, et de 72% après ajout du cadmium.

C'est ce que rapporte également **Kranner & Colville (2011)**, qui confirment l'inhibition de la croissance racinaire chez plus de 15 espèces végétales en présence de concentrations croissantes de métaux (Cr, Cd, Cu, Zn, Pb, Ni et Hg). L'analyse de l'action spécifique des métaux sur la cinétique de croissance racinaire montre que, pendant la phase d'élongation, le cadmium inhibe significativement la croissance. Cette inhibition est d'autant plus importante que les concentrations en Cd sont en augmentation. Ce résultat corrobore ceux obtenus des effets du Cu, Pb, Zn et Hg, qui entraînent une inhibition de la croissance des racicules d'*Arabidopsis thaliana* L., mais n'inhibent pas la germination (**Li et al. 2005**). En revanche, le Cd inhibe la germination et la croissance racinaire à des concentrations similaires (**Fatarna et al. 2017**).

Les mesures des parties aériennes réalisées sur nos plantules ne donnent pas de différences significatives entre les différents lots considérés par rapport aux différentes concentrations appliquées et vis-à-vis des témoins. L'insuffisance du développement de cette partie ne permet pas une discrimination entre les différents résultats obtenus.

IV.2.4. Discussion relative à la quantification de la proline

Lorsqu'on quantifie la proline des plantules de *L. stoechas* L., rapportée au poids frais ou au poids sec, une quantité supérieure à celle des témoins est obtenue uniquement avec les plantules issues d'une application préalable au Zn de 100 ppm. La même application en Cr de 100 ppm ne modifie pas ce contenu, il est de même niveau que celui des témoins lorsqu'il est exprimé par rapport au poids frais. Il diminue lorsqu'il est exprimé par rapport au poids sec.

Toutes les autres concentrations, que ce soit pour le Zn ou le Cr, font baisser les niveaux de la proline rapportés en poids frais ou en poids sec. Cette baisse est plus marquée chez les plantules issues des traitements au Cr.

La proline est un acide aminé, considéré comme un soluté que les plantes peuvent accumuler en réponse à divers types de stress, dont celui induit par la toxicité des métaux lourds (Verslues et al. 2006 ; Bose and Yadav, 2007 ; Sharma and Dietz, 2009 ; Siddique and Dubey, 2017). La capacité d'accumulation de la proline varie par rapport au niveau du stress et d'une espèce à une autre (Verbruggen and Hermans, 2008 ; Hayat et al. 2012).

La biosynthèse de la proline est initiée lorsque des plantes sont traitées aux métaux lourds. En conséquence, l'activité de la superoxyde dismutase et des lésions membranaires apparaissent. La proline dans ces cas est nouvellement synthétisée et pourrait jouer un rôle protecteur (Kavi Kishor et al. 1995 ; Siddique and Dubey, 2017).

Lorsque la toxicité des métaux lourds s'amplifie au niveau des tissus végétaux, un stress oxydatif s'installe provoquant une peroxydation des lipides et une fuite depuis les cellules du potassium, perturbant le fonctionnement des cellules. Les plantes capables d'accumuler de la proline dans de telles situations évitent ces problèmes de peroxydation et de fuite du potassium. C'est ce qui se passe lorsqu'on rajoute de la proline exogène à ces tissus (Mehta and Gaur, 1999 ; Cuin and Shabala, 2007 ; Hasanuzzaman et al. 2014 ; Siddique et al. 2018).

CONCLUSION

V. Conclusion

Ce travail a été mené tout d'abord sur des graines de *Lavandula stoechas* L., qui ont été soumises lors de leur germination à des concentrations variées de deux éléments métalliques, le Zn et le Cr. Le suivi de ce processus de germination a duré une vingtaine de jours.

Ce qui a été remarqué lors du déroulement de la germination, c'est le temps de latence de plus de deux jours, pris par les graines pour amorcer leur germination. L'accroissement au cours du temps des pourcentages cumulés moyens de germination répond aux courbes typiques de type sigmoïdale, qui peuvent être rapides ou assez lentes selon le type du métal utilisé et la concentration testée pour chacun des métaux.

La concentration de 300 ppm en Zn a donné le meilleur pourcentage de germination au final des graines, tandis que les deux concentrations de 100 et 200 ppm en Cr améliorent sensiblement la capacité germinative des graines avec en sus des temps moyens de germination raccourcis. En revanche, les concentrations les plus élevées utilisées réduisent sensiblement la germination des graines avec des temps moyens de germinations plus longs.

Les plantules de *L. stoechas* L. issues de ces germinations ont été testées vis-à-vis de plusieurs paramètres relatifs au statut de l'eau (poids frais, poids sec et teneur en eau), aux mesures biométriques (parties racinaires et aérienne) et à la quantification de la proline.

Si on se restreint uniquement aux teneurs en eau enregistrées, on note que les concentrations de 100 ou 200 ppm en Zn ou en Cr sont sans incidence notable sur la teneur en eau des plantules qui en sont issues. Le déclin s'observe à partir de la concentration de 300 ppm en Cr et pour la concentration de 400 ppm en Zn. Il y a lieu de noter que la concentration de 300 ppm en Zn, maintient sensiblement la teneur en eau des plantules qui en sont issues, aux mêmes niveaux que les teneurs en eau des plantules témoins.

Les mesures biométriques menées n'ont pas tranchés entre les effets des deux métaux vis-à-vis de la longueur des parties aériennes des plantules analysées. Les résultats des mesures effectuées tendent vers une valeur unifiée pour l'ensemble des concentrations testées par rapport aux deux types de métaux utilisés et par rapport à la partie aérienne mesurée depuis les plantules témoins.

Cependant, l'analyse des parties racinaires des plantules issues des deux traitements préalables au Zn ou au Cr, tranche en faveur du premier métal cité. En effet, les longueurs racinaires des plantules issues d'un traitement préalable au Zn sont toujours plus longues que celles issues d'un traitement préalable au Cr, et ce lorsqu'on fait le comparatif concentration par concentration. Sinon, l'incidence du Zn aux fortes concentrations, encore plus pour ce qui est du Cr, affecte sensiblement la croissance des parties racinaires.

Pour rendre au mieux ces observations, la quantification d'un soluté compatible, comme la proline, aux multiples rôles dont la protection, rend au mieux ce qui a été déduit auparavant.

Ainsi, une accumulation de la proline a été observée uniquement chez les plantules issues d'un traitement préalable des graines avec une concentration de 100 ppm en Zn. Le même traitement en Cr ne modifie pas le contenu en proline des plantules qui en sont issues par rapport aux plantules témoins, et toutes les autres concentrations restantes ne font que réduire les quantités en proline des plantules correspondantes. Cette réduction est plus notable avec le traitement au Cr qu'avec le traitement au Zn.

L'influence du Cr affecte notablement la croissance des plantules de *L. stoechas* L., plus que ce qui a été observé avec le Zn, particulièrement lorsque les concentrations utilisées augmentent. Ceci n'a pas été observé lors du déroulement de la germination des graines. Ce processus étant moins vulnérable que l'étape croissance et serait un mécanisme des plus résistants parmi les autres processus liés au développement d'une plante.

***RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES***

Abbas G., Murtaza B., Bibi I., Shahid M., Niazi N.K., Khan M.I., Amjad M., Hussain M., Natasha (2018). Arsenic uptake, toxicity, detoxification, and speciation in plants: physiological, biochemical, and molecular aspects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 15(1): 59.

<https://dx.doi.org/10.3390/ijerph15010059>

Adjaoute L. & Bouchal O. (2017). Effets des métaux lourds sur les graines de *Parkinsonia aculeata* L. *Mémoire de fin de cycle, Master, Université A. Mira de Bejaia*. 45 p.

Akbar S. (2020). *Lavandula stoechas* L. (Lamiaceae). Handbook of 200 medicinal plants. A comprehensive review of their traditional medical uses and scientific justifications. *Springer*. 1077-1083. ISBN: 978-3-030-16807-0

Almansouri M., Kinet J.M., Lutts S. (2001). Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Plant and Soil* 231, 243-254. <https://dx.doi.org/10.1023/A:1010378409663>

Amara N., Boukhatem M., Ferhat M., Kaibouche N., Laissaoui O. & Boufridi A. (2018). Applications potentielles de l'huile essentielle de lavande papillon (*Lavandula stoechas* L.) comme conservateur alimentaire naturel. *Phytothérapie* 16, 164-172. doi.org/10.3166/phyto-2019-0154

Anzala F. (2006). Contrôle de la vitesse de germination chez le maïs (*Zea mays*) : étude de la voie de biosynthèse des acides aminés issus de l'aspartate et recherche de QTLs. *Thèse de Doctorat en Biologie Cellulaire et Moléculaire Végétale : Ecole Doctorale d'Angers, France*. 149 p. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00181021>

Arroudj S. (2019). Effets d'un stress sur les premiers stades de croissance d'un végétal. *Mémoire de fin de cycle, Master, Université A. Mira de Bejaia*. 47 p.

Aydinalp C. & Marinova S. (2009). The effects of heavy metals on seed germination and plant growth on alfalfa plant (*Medicago sativa*). *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 15, 347-350.

Baize D. (1997). Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. *Eds. INRA, France*. 408 p.

Bansal P. & Sharma P. (2000). Effect of Pb²⁺ and Cd²⁺ on respiration and mitochondrial electron transport chain in germinating pea seeds (*Pisum sativum* L.). *Indian J. Environ. Ecoplan.* 3, 249-254.

Bansal P., Sharma P., Dhindsa K. (2001). Impact of Pb²⁺ and Cd²⁺ on activities of hydrolytic enzymes in germinating pea seeds. *Ann. Agri-Bio. Res.* 6, 113-122.

Bates L.S., Waldren R.P., Teare I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39(1), 205-207.

<https://dx.doi.org/10.1007/BF00018060>

Benabdelkader T. (2012). Biodiversité, bioactivité et biosynthèse des composés terpéniques volatils des lavandes ailées, *Lavandula stoechas* sensu lato, un complexe d'espèces méditerranéennes d'intérêt pharmacologique. *Thèse de Doctorat en cotutelle : Université Jean Monnet – Saint-Etienne (France) ; Ecole normale supérieure de Kouba (Algerie)*. 282 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00952695>

Bewley J. (1997). Seed germination and dormancy. *The Plant Cell* 9, 1055-1066. [doi:10.1105/tpc.9.7.1055](https://doi.org/10.1105/tpc.9.7.1055)

Bohnert H.J. & Sheveleva E. (1998). Plant stress adaptations – making metabolism move. *Current Opinion in Plant Biology* 1(3), 267-274. [https://dx.doi.org/10.1016/S1369-5266\(98\)80115-5](https://dx.doi.org/10.1016/S1369-5266(98)80115-5)

Bose B. Yadav R.S. (2007). PEG induced moisture stress: Screening for drought tolerance in rice. *Indian Journal of Plant Physiology* 12(1), 88-90.

Boukhatem M., Ferhat M., Benassel N. & Kameli A. (2020). Lavande papillon (*Lavandula stoechas* L.) : une plante à parfum aux multiples vertus. *Phytothérapie* 18, 30-44. doi.org/10.3166/phyto-20190163

Carlson C.L., Adriano D.C., Sajwan K.S., Abels S.L., Thoma D.P., Driver J.T. (1991). Effects of selected trace metals on germinating seeds of six plant species. *Water, Air and Soil Pollution (Netherlands)* 59(3), 231-240. [ISSN : 0049-6979](https://doi.org/10.1007/BF00496979)

Chasapis C.T., Ntoupa P.S.A., Spiliopoulou C.A., Stefanidou M.E. (2020). Recent aspects of the effects of zinc in human health. *Arch Toxicol* 94(5), 1443-1460. <https://dx.doi.org/10.1007/s00204-020-02702-9>

Cherief I. & Amrane F. (2016). Effet du cuivre sur les paramètres physiologiques et morphologiques chez la fève (*Vicia faba* L.). *Mémoire de fin de cycle, Master, Université de Mostaganem*. <https://e-biblio.univ-mosta.dz/handle/123456789/2441>

Chugh L.K. & Sawhney S.K. (1996). Effect of cadmium on germination, amylases and rate of respiration of germinating pea seeds. *Environmental Pollution* 92(1), 1-5. [https://dx.doi.org/10.1016/0269-7491\(95\)00093-3](https://dx.doi.org/10.1016/0269-7491(95)00093-3)

Côme D. (1970). Les obstacles à la germination. *Publications de la Société Linnéenne de Lyon*, 40-47.

Côme D. (1982). Facteurs généraux de la germination. In *Croissance et développement*. Mazliak P, ed. Hermann, Paris, 159-184.

Côme D. (1993). Apports de la recherche à l'amélioration de la qualité germinative des semences. *Acad. Agric. Fr.* 79, 35-46.

Côme D. (1993). Rôle des facteurs du milieu dans la germination et la survie des semences. *Dans : Les problèmes des semences forestières notamment en Afrique. Actes finaux du symposium du groupe de travail IUFROP.2.04.00, Ouagadougou, Burkina Faso, 23-28 Novembre 1992. Somé L, de Kam M. (eds.), Backhuys Publisher: Leiden the Netherlands, pp. 131-142.*

Côme D. & Corbineau F. (1998). Semences et germination. *Dans : Physiologie végétale II. Croissance et développement. P. Mazliak Ed., Hermann, Paris, pp. 185-313. ISBN: 2-7056-6349-5*

Côme D. & Corbineau F. (2006). Dictionnaire de la biologie des semences et des plantules. Editions Tec & DOC Lavoisier.

Corbineau F. (2020). Encyclopédie : Question sur... Qu'est-ce que le processus de germination ? *Académie d'Agriculture de France, fiche question sur... n° 06.04.Q01.* <http://www.academie-agriculture.fr/sites/default/files/publications/encyclopedie/>

Cuin T.A. & Shabala S. (2007). Compatible solutes reduce ROS-induced potassium efflux in Arabidopsis roots. *Plant, Cell & Environment* 30(7), 875-885. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01674.x>

Cushman J.C. & Bohnert H.J. (2000). Genomic approaches to plant stress tolerance. *Current Opinion in Plant Biology* 3, 117-124. [https://dx.doi.org/10.1016/S1369-5266\(99\)00052-7](https://dx.doi.org/10.1016/S1369-5266(99)00052-7)

Datta J.K., Bandhyopadhyay A., Banerjee A., Mondal N.K. (2011). Phytotoxic effect of chromium on the germination, seedling growth of some wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under laboratory condition. *J. Agric. Technol* 7, 395-402.

Davis J. (2020). Lavender: History, taxonomy and production. Written by J.A. McCoy (1999). Updated by J.M. Davis in 2017 and 2020. <https://newcropsorganics.ces.ncsu.edu/herb/lavender-history-taxonomy-and-production/>

Delauney A.J. & Verma D.P.S. (1993). Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *The plant journal* 4(2), 215-223. <https://dx.doi.org/10.1046/j.1365-313X.1993.04020215.x>

Demirkaya M., Aydin B., Dalda Sekerci A. & Gulsen O. (2017). Effects of osmotic conditioning treatments of lavender (*Lavandula angustifolia*) seeds on mean germination time and germination rate. *International Journal of Secondary Metabolite* 4, 418-422. [doi:10.21448/ijsm.375118](https://doi.org/10.21448/ijsm.375118)

Di Salvatore M., Garafa A.M., Carratù G. (2008). Assessment of heavy metals phytotoxicity using seed germination and root elongation tests: A comparison of two growth substrates. *Chemosphere* 73(9), 1461-1464. <https://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.07.061>

Doran J.C. & Gunn B.V. (1987). Treatments to promote seed germination in Australian acacias. In the series analytic: Australian acacias in developing countries, edited by J.W. Turnbull. *Proceedings of an International workshop held August 4-7, 1986, at the Forestry Training Centre, Gympie, Qld., Australia*, 57-63.

Dotaniya M.L., Thakur J.K., Meena V.D., Jajoria D.K., Rathor G. (2014). Chromium pollution: a threat to environment – A review. *Agric. Review* 35(2), 153-157. <https://dx.doi.org/10.5958/0976-0741.2014.00094.4>

Ernst W.H.O. (1998). Effects of heavy metals in plants at the cellular and organismic level. In Schüürmann G. & Markert B. (eds.) *Ecotoxicology*. Wiley, New York, Spektrum, Heidelberg, 587-620.

Evenari M. (1957). The physiological action and biological importance of germination inhibitors. *Symposia of the Society for Experimental Biology* 11, 21-44.

Fatarna L., Boutekrabt A., Arabi Y., Adda A. (2017). Impact du cadmium, du zinc et du plomb sur la germination des grains d'*Atriplex halimus* L. (*Amaranthaceae*). *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)* 72(1), 61-72. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03532573>

Fernandes J.C. & Henriques F.S. (1991). Biochemical, physiological and structural effects of excess copper in plants. *The Botanical Review* 57, 246-273. <https://dx.doi.org/10.1007/BF02858564>

Fourest E. (1993). Etude des mécanismes de biosorption des métaux lourds par des biomasses fongiques industrielles en vue d'un procédé d'épuration des effluents aqueux contaminés. *Thèse de Doctorat en Biologie, Grenoble I*. www.theses.fr/1993GRE10142

Guyot-Declerck C., Renson S., Bouseta A. & Collin S. (2002). Floral quality and discrimination of *Lavandula stoechas*, *Lavandula angustifolia* and *Lavandula angustifolia x latifolia* honeys. *Food Chemistry* 79, 453-459. <https://dx.doi.org/10.1016/j.crv.2014.05.006>

Hasanuzzaman M., Nahar K., Gill S.S., Fujita M. (2014). Drought stress responses in plants, oxidative stress, and antioxidant defense. In Tuteja N. & S.S. Gill, *Climate change and plant abiotic stress tolerance. 1st Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGAA*. 209-249.

Hayat S., Hayat Q., Alyemeni M.N., Wani A.S., Pichtel J., Ahmad A. (2012). Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signaling & Behavior* 7(11), 1456-1466. <https://dx.doi.org/10.4161/psb.21949>

Hong Z., Lakkineni K., Zhang Z., Verma D.P. (2000). Removal of feedback inhibition of Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate synthetase results in increased proline accumulation and protection of plants from osmotic stress. *Plant Physiology* 122(4), 1129-1136. <https://dx.doi.org/10.1104/pp.122.4.1129>

Hopkins G.H. (2003). Physiologie végétale. De Boeck Université, Bruxelles, 2^{ème} édition, 514 pp. [ISBN-13 : 9782744500893](#)

Jordan J.L. & Haferkamp M.R. (1989). Temperature responses and calculate heat units for germination of several range grasses and shrubs. *Journal of Range Management* 42(1), 41-45.

Kavi Kishor P.B., Hong Z., Miao G.H., Hu C.A., Verma D.P.S. (1995). Overexpression of Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate synthetase increases proline production and confers osmotolerance in transgenic plants. *Plant Physiology* 108, 1387-1394. [ISSN : 0032-0889](#)

Khan M.A., Gul B., Weber D.J. (2002). Seed germination in the great basin halophyte *Salsola iberica*. *Canadian Journal of Botany* 80(6), 650-655. <https://dx.doi.org/10.1139/B02-046>

Kranner I. & Colville L. (2011). Metals and seeds: Biochemical and molecular implications and their significance for seed germination. *Environmental and Experimental Botany* 72(1), 93-105. <https://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.005>

Lefèvre I., Marchal G., Corréal E., Zanuzzi A., Lutts S. (2009). Variation in response to heavy metals during vegetative growth in *Dorycnium pentaphyllum* Scop. *Plant Growth Regulation* 59, 1-11. <https://dx.doi.org/10.1007/s10725-009-9382-z>

Li W., Khan M.A., Yamaguchi S., Kamiya Y. (2005). Effects of heavy metals on seed germination and early seedling growth of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Growth Regulation* 46, 45-50. <https://dx.doi.org/10.1007/s10725-005-6324-2>

Lis-Balchin M. (2002). Lavender. The genus *Lavandula*. In Book series: Medicinal and aromatic plants – Industrial profiles, Vol. 29. Hardman, R. (ed). Taylor & Francis, New York. [ISBN: 0-203-21652-0](#)

Mahmood S., Hussain A., Saeed Z., Athar M. (2005). Germination and seedling growth of corn (*Zea mays* L.) under varying levels of copper and zinc. *International Journal of Environmental Science & Technology* 2, 269-274. <https://dx.doi.org/10.1007/BF03325886>

Maret W. (2019). Chromium supplementation in human health, metabolic syndrome, and diabetes. In *Essential metals in medicine: therapeutic use and toxicity of metal ions in the clinic*, De Gruyter. doi:10.1515/9783110527872-015

Meena M., Divyanshu K., Kumar S., Swapnil P., Zehra A., Shukla V., Yadav M., Upadhyay R.S. (2019). Regulation of L-proline biosynthesis, signal transduction, transport, accumulation and its vital role in plants during variable environmental conditions. *Heliyon* 5(12):e02952. <https://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02952>

Mehta S.K. & Gaur J.P. (1999). Heavy-metal-induced proline accumulation and its role in ameliorating metal toxicity in *Chlorella vulgaris*. *New Phytologist* 143(2), 253-259. <https://dx.doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00447.x>

Mertens J., Smolders E. (2012). Zn. In *B.J. Alloway Ed., Heavy metals in soils, trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. Part of the Environmental pollution book series (EPOL, volume 22)*. Springer, 465-493.

Mihoub A., Chaoui A., El Ferjani E. (2005). Changements biochimiques induits par le cadmium et le cuivre au cours de la germination des graines de petit pois (*Pisum sativum* L.). *Comptes Rendus Biologies* 328(1), 33-41. <https://dx.doi.org/10.1016/j.crv.2004.10.003>

Morel J.L. (1997). Bioavailability of trace elements to terrestrial plants. In *J. Tarradellas, G. Bitton, D. Rossel (ed.) Soil ecotoxicology*. Lewis Publishers, New York, 142-176.

Moya S., Guitton Y., Nicolè F., Legendre L., Pasquier B., Upson T. & Jullien F. (2016). Genome size and plastid trnK-matK markers give new insights into the evolutionary history of the genus *Lavandula* L. *Plant Biosystems – An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology* 150, 1216-1224. <https://dx.doi.org/10.1080/11263504.2015.1014006>

Munzuroglu O. & Geckil H. (2002). Effects of metals on seed germination, root elongation, and coleoptile and hypocotyl growth in *Triticum aestivum* and *Cucumis sativus*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 43, 203-213. <https://dx.doi.org/10.1007/s00244-002-1116-4>

Murthy M.K., Khandayataray P., Padhiary S., Samal D. (2022). A review on chromium health hazards and molecular mechanisms of chromium bioremediation. *Rev Environ health*. <https://dx.doi.org/10.1515/reveh-2021-0139>

Nuccio M.L., Rhodes D., McNeil S.D., Hanson A.D. (1999). Metabolic engineering of plants for osmotic stress resistance. *Current Opinion in Plant Biology* 2, 128-134. <https://biomednet.com/elecref/1369526600200128>

Okereafor U., Makhatha M., Mekuto L., Uche-Okereafor N., Sebola T., Mavumengwana V. (2020). Toxic metal implications on agricultural soils, plants, animals, aquatic life and human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17, 2204, 24 p. <https://dx.doi.org/10.3390/ijerph17072204>

Oliveira H. (2012). Chromium as an environmental pollutant: insights on induced plant toxicity. *Journal of Botany* 2012, 9 p. <https://dx.doi.org/10.1155/2012/375843>

Ouhimi L. & Rahab D. (2021). Les effets de l'osmopriming sur la germination des graines de la lavande (*Lavandula stoechas* L.) sous une contrainte saline. *Mémoire de fin de cycle, Master, Université A. Mira de Bejaia*. 54 p.

Patriarca E.J., Cermola F., D'Aniello C., Fico A., Guardiola O., De Cesare D., Minchiotti G. (2021). The multifaceted roles of proline in cell behavior. *Frontiers in Cell and Developmental Biology* 9, 728576. <https://dx.doi.org/10.3389/fcell.2021.728576>

Peng Z., Lu Q., Verma D.P. (1996). Reciprocal regulation of Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate synthetase and proline dehydrogenase genes controls proline levels during and after osmotic stress in plants. *Molecular and General Genetics* 253(3), 334-341. <https://dx.doi.org/10.1007/pl00008600>

Redondo-Gómez S., Mateos-Naranjo E., Davy A.J., Fernández-Muñoz F., Castellanos E.M., Luque T., Figueroa M.E. (2007). Growth and photosynthetic responses to salinity of the salt-marsh shrub *Atriplex portulacoides*. *Annals of Botany* 100(3), 555-563. <https://dx.doi.org/10.1093/aob/mcm119>

Robert M., Juste C. (1997). Stocks et flux d'éléments traces dans les sols du territoire. In *Aspects sanitaires et environnementaux de l'épandage agricole des boues d'épuration urbaines. ADEME Journées techniques des 5 et 6 juin 1997, ADEME éd.* 320p.

Roohani N., Hurrell R., Kelishadi R., Schulin R. (2013). Zinc and its importance for human health: An integrative review. *J Res Med Sci* 18(2), 144-157. [PMCID: PMC3724376](#)

Saadi A. & Zeggane C. (2021). Les effets de l'osmopriming sur la germination des graines de la lavande (*Lavandula stoechas* L.) sous une contrainte hydrique. *Mémoire de fin de cycle, Master, Université A. Mira de Bejaia*. 57 p.

Sharma S.S. & Dietz K.J. (2009). The relationship between metal toxicity and cellular redox imbalance. *Trends in Plant Science* 14(1), 43-50. <https://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2008.10.007>

Siddique A. & Dubey A.P. (2017). Phyto-toxic effect of heavy metal (CdCl₂) on seed germination, seedling growth and antioxidant defence metabolism in wheat (*Triticum aestivum* L.) variety HUW-234. *International Journal of Bio-resource and Stress Management* 8(2), 261-267. <https://dx.doi.org/10.23910/IJBSM/2017.8.2.1684>

Siddique A., Kandpal G., Kumar P. (2018). Proline accumulation and its defensive role under diverse stress condition in plants: An overview. *Journal of Pure and Applied Microbiology*. 12(3), 1655-1659. <https://dx.doi.org/10.22207/JPAM.12.3.73>

Smirnoff N. (1998). Plant resistance to environmental stress. *Current Opinion in Biotechnology* 9(2), 214-219. [https://dx.doi.org/10.1016/s0958-1669\(98\)80118-3](https://dx.doi.org/10.1016/s0958-1669(98)80118-3)

Sparks D.L. (1998). Environmental soil chemistry. *Academic Press*, 267 p.

Stanton C., Sanders D., Krämer U., Podar D. (2021). Zinc in plants: integrating homeostasis and biofortification. *Molecular Plant* 15(1), 65-85. [doi:10.1016/j.molp.2021.12.008](https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.12.008)

Szabados L. & Savaouré A. (2010). Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science* 15(2), 89-97. <https://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009>

Troll W. & Lindsley J. (1955). A photometric method for the determination of proline. *The Journal of Biological Chemistry* 215(2), 655-660. [PMID: 13242563](#)

Trovato M., Mattioli R., Costantino P. (2008). Multiple roles of proline in plant stress tolerance and development. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*. 19(4), 325-346. <https://dx.doi.org/10.1007/s12210-008-0022-8>

Turner N.C. (1986). Crop water deficits: A decade of progress. *Advances in Agronomy* 39, 1-51. [https://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60464-2](https://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60464-2)

Upson T. & Andrews S. (2004). The genus *Lavandula*. Botanical Magazine Monograph. Royal Botanic Gardens, Kew, pp. 456. ISBN-13 : 978-1842460108

Verbruggen N. & Hermans C. (2008). Proline accumulation in plants: A review. *Amino Acids*. 35(4), 753-759. <https://dx.doi.org/10.1007/s00726-008-0061-6>

Verslues P.E., Agarwal M., Katiyar-Agarwal S., Zhu J., Zhu J.-K. (2006). Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *The Plant Journal: for Cell and Molecular Biology*. 45(4), 523-539. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1365-313X.2005.02593.x>

Verslues P.E. & Sharma S. (2010). Proline metabolism and its implications for plant-environment interaction. *Arabidopsis Book*, 8: e-140. <https://dx.doi.org/10.1199/tab.0140>

Woolhouse H.W. (1983). Toxicity and tolerance in response of plants to metals. In Lange O.L., Nobel P.S., Osmond C.B. & Ziegler H. (Eds), *Encyclopaedia of plant physiologie, New Series, Vol. 12C*, Springer-Verlag, Berlin. 245-300. <https://www.apis.ac.uk/toxicity-and-tolerance-responses-plants-metals>

Résumé :

Notre étude a pour objectif de déterminer l'effet du zinc (Zn) et du chrome (Cr) sur la germination des graines et les premiers stades de la croissance des plantules de *Lavandula stoechas* L. Une espèce d'une grande importance écologique, susceptible de jouer un rôle dans la dépollution des sols des effets toxiques des métaux lourds.

Les graines ont été mises à germer en présence du $K_2Cr_2O_7$ et du $ZnSO_4$ apportés à des concentrations variables et en conditions de travail contrôlées (température de 20°C et en obscurité). Les résultats obtenus ont montré que les graines ainsi traitées se caractérisent par une bonne aptitude à germer en présence du Cr aux concentrations de 100 et 200 ppm, tandis que la concentration de 300 ppm en Zn stimule le pouvoir germinatif des graines obtenu au final. Au-delà, le pouvoir germinatif décline avec l'élévation de la concentration des éléments traces utilisés.

Les mesures de teneur en eau, des longueurs racinaires et de la proline menées sur les plantules issues des traitements appliqués au préalable aux graines rendent au mieux les observations obtenues de la germination et montrent l'effet plus toxique induit par le Cr par rapport au Zn.

Mots-clés : *Lavandula stoechas* L. ; métaux lourds ; germination ; statut hydrique ; mesures biométriques ; proline.

Abstract:

The objective of this study was to see how zinc and chromium affected seed germination and early growth of seedlings of *Lavandula stoechas* L., an ecologically important species that may play a role in soil remediation from heavy metal toxicity.

Seeds germinated in the presence of variable concentrations of $K_2Cr_2O_7$ and $ZnSO_4$ under controlled working conditions (temperature of 20°C and darkness). The results showed that the seeds treated in this way were characterized by a good ability to germinate in the presence of Cr at concentrations of 100 and 200 ppm, while the concentration of 300 ppm of Zn stimulated the germination ability of the seeds obtained in the end. Above this level, germinability declines with increasing concentrations of the trace elements used.

Water content, root length, and proline levels in seedlings from pre-applied seed treatments best reflect germination observations and show that Cr is more toxic than Zn.

Keywords: *Lavandula stoechas* L.; heavy metals; germination; water status; biometric measurements; proline.

Résumé :

Notre étude a pour objectif de déterminer l'effet du zinc (Zn) et du chrome (Cr) sur la germination des graines et les premiers stades de la croissance des plantules de *Lavandula stoechas* L. Une espèce d'une grande importance écologique, susceptible de jouer un rôle dans la dépollution des sols des effets toxiques des métaux lourds.

Les graines ont été mises à germer en présence du $K_2Cr_2O_7$ et du $ZnSO_4$ apportés à des concentrations variables et en conditions de travail contrôlées (température de 20°C et en obscurité). Les résultats obtenus ont montré que les graines ainsi traitées se caractérisent par une bonne aptitude à germer en présence du Cr aux concentrations de 100 et 200 ppm, tandis que la concentration de 300 ppm en Zn stimule le pouvoir germinatif des graines obtenu au final. Au-delà, le pouvoir germinatif décline avec l'élévation de la concentration des éléments traces utilisés.

Les mesures de teneur en eau, des longueurs racinaires et de la proline menées sur les plantules issues des traitements appliqués au préalable aux graines rendent au mieux les observations obtenues de la germination et montrent l'effet plus toxique induit par le Cr par rapport au Zn.

Mots-clés : *Lavandula stoechas* L. ; métaux lourds ; germination ; statut hydrique ; mesures biométriques ; proline.

Abstract:

The objective of this study was to see how zinc and chromium affected seed germination and early growth of seedlings of *Lavandula stoechas* L., an ecologically important species that may play a role in soil remediation from heavy metal toxicity.

Seeds germinated in the presence of variable concentrations of $K_2Cr_2O_7$ and $ZnSO_4$ under controlled working conditions (temperature of 20°C and darkness). The results showed that the seeds treated in this way were characterized by a good ability to germinate in the presence of Cr at concentrations of 100 and 200 ppm, while the concentration of 300 ppm of Zn stimulated the germination ability of the seeds obtained in the end. Above this level, germinability declines with increasing concentrations of the trace elements used.

Water content, root length, and proline levels in seedlings from pre-applied seed treatments best reflect germination observations and show that Cr is more toxic than Zn.

Keywords: *Lavandula stoechas* L.; heavy metals; germination; water status; biometric measurements; proline.