

## I. Le test germinatif

Il s'agit d'évaluer l'influence des concentrations croissantes en  $\text{CdCl}_2$  sur le taux et la vitesse de germination des graines d'*A. nummularia*.

### 1.1. Le taux de germination

Les résultats obtenus montrent que le pourcentage de germination des graines d'*A. nummularia* obtenu au bout de 15 jours varie en fonction de la concentration en  $\text{CdCl}_2$  du milieu (**Figure 20**).

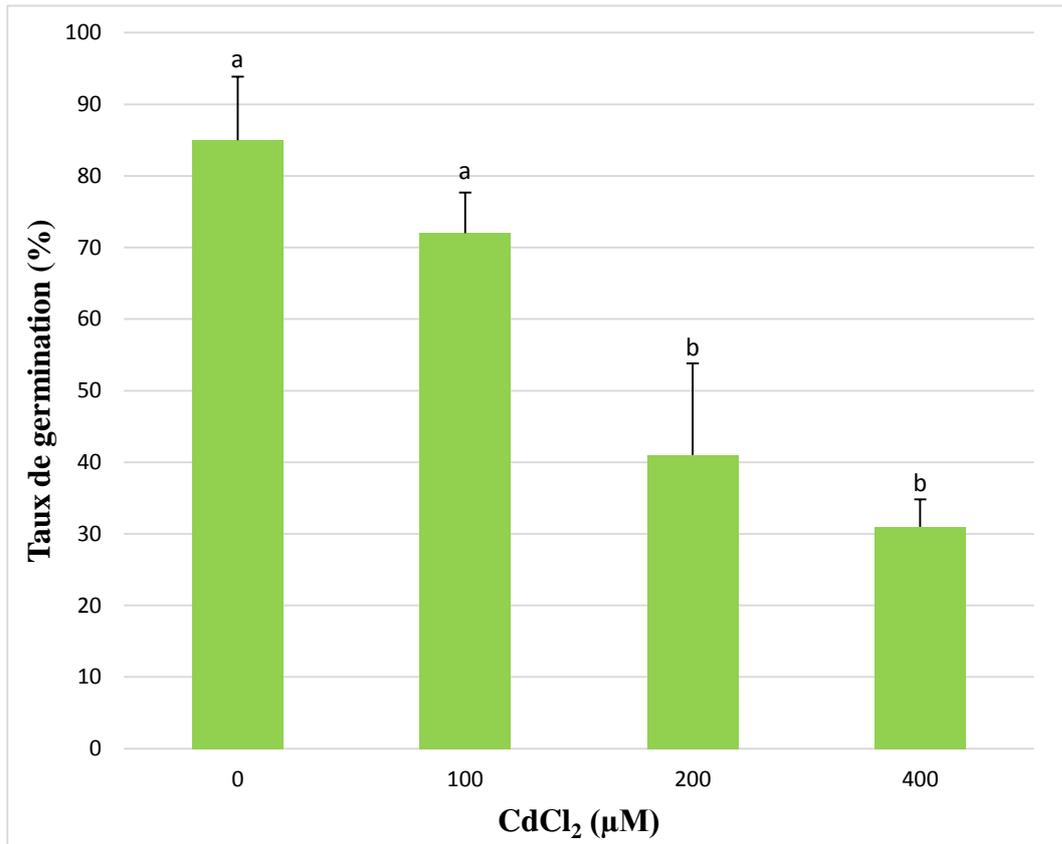
En absence du cadmium (témoin), le taux de germination est égal à 85%. Pour la concentration  $100\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2$ , la capacité germinative est de 72%. Cependant avec les concentrations 200 et  $400\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2$ , le taux de germination a diminué respectivement de 44% et 54% par rapport au témoin.

Statistiquement, l'analyse de la variance montre qu'il existe un effet très hautement significatif ( $P < 0.001$ ) de la concentration en  $\text{CdCl}_2$  sur le taux de germination (**Tableau 3**).

Le test de *Tukey* au seuil de 5%, qui permet de classer les traitements en groupes homogènes, met en évidence une différence significative entre la concentration de  $100\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2$  qui fait partie du groupe (a) et le groupe (b) qui correspond à une concentration de  $200\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2$  (**Figure 20**). Le seuil de sensibilité de la germination au  $\text{CdCl}_2$  se situerait dans l'intervalle des concentrations comprises entre 100 et  $200\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2$ .

**Tableau 3.** Analyse de la variance du pourcentage de germination des graines d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	52441.00	52441.00	724.9908	0.000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CdCl}_2$ )	3	7763.00	2587.67	35.7742	<b>0.000003</b>
Erreur	12	868.00	72.33		
Total	15	8631.00			

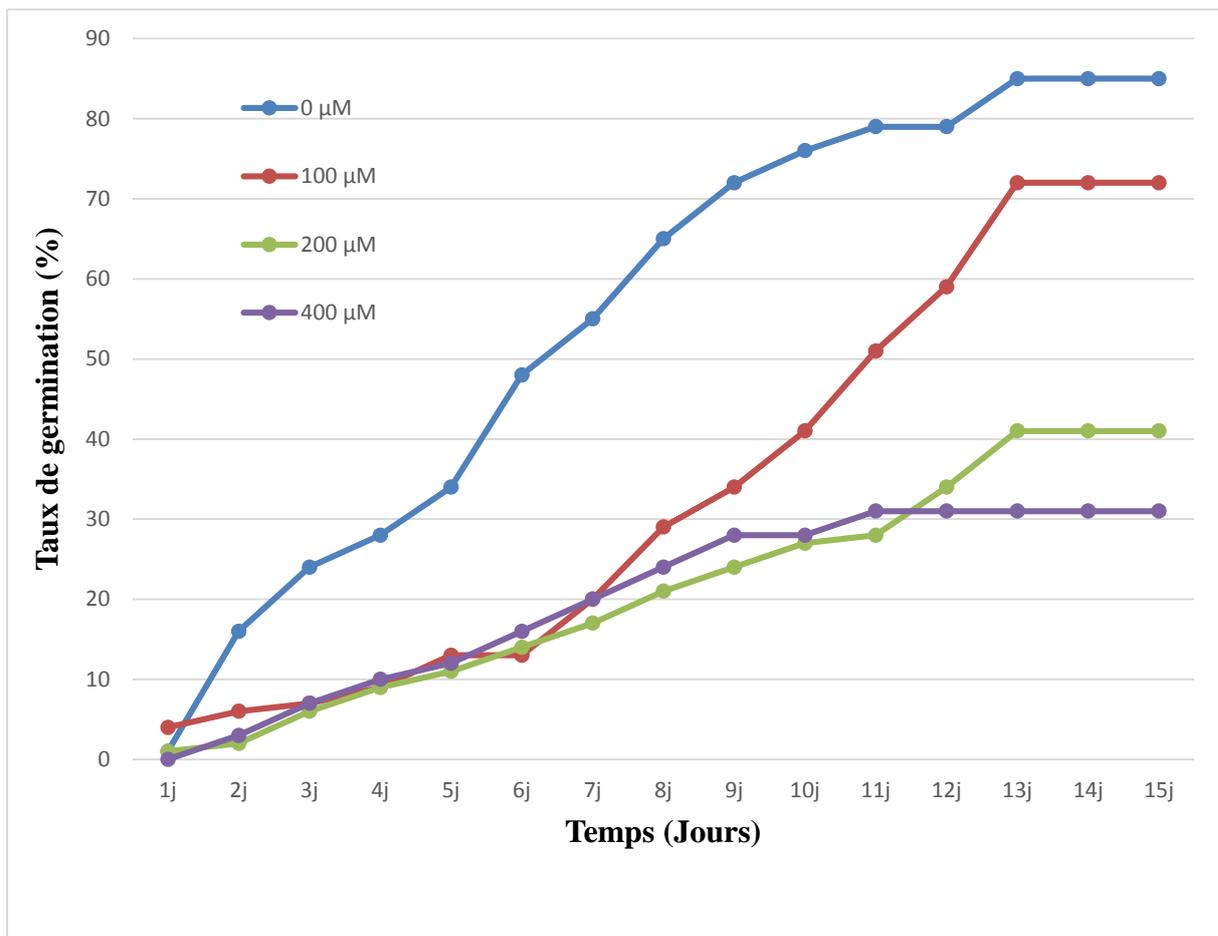


**Figure 20.** Taux de germination des graines d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  ET (n =4). Les différentes lettres au-dessus des barres indiquent une différence significative à  $P < 0.05$  selon le test de *Tukey*.

### 1.2. La vitesse de germination

Les résultats de la **Figure 21** montrent que pour les concentrations 0 et 100µM CdCl<sub>2</sub>, la germination est rapide durant les premiers jours et suit une évolution parallèle, caractérisée dans un premier temps par une augmentation des taux cumulés respectifs enregistrés jusqu'à 85% et 72% au 13<sup>ème</sup> jour. Au-delà, les taux cumulés se maintiennent jusqu'à la fin de l'expérience.

Par contre, dans les lots des graines recevant les concentrations 200 et 400µM CdCl<sub>2</sub>, les taux cumulés de germination suivent une progression lente puis se ralentissent pour atteindre un palier à partir du 13<sup>ème</sup> jour où ils marquent des taux de 41% et 31% respectivement.



**Figure 21.** Vitesse de germination des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ .

## II. La culture hydroponique

### 2.1. Les paramètres de croissance

#### 2.1.1. Nombre de feuilles

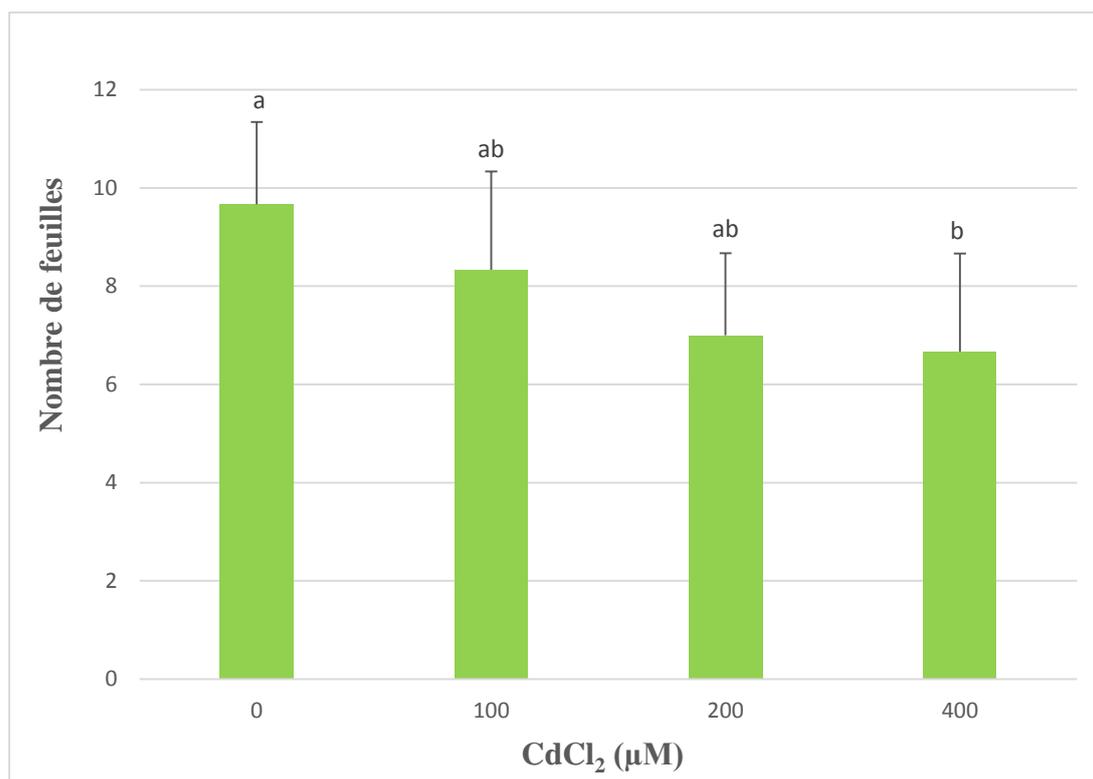
Les résultats obtenus montrent que parmi les différentes concentrations de CdCl<sub>2</sub> testées, seule la concentration 400µM qui présente un effet dépressif sur le nombre de feuilles des plantules d'*A. nummularia* par rapport au témoin.

Statistiquement, l'analyse de la variance montre qu'il existe un effet significatif ( $P < 0.05$ ) de la concentration en CdCl<sub>2</sub> sur le nombre de feuilles des plantules d'*A. nummularia* (**Tableau 4**).

Selon le test de *Tukey* au seuil de 5%, le traitement correspond à la concentration 0µM CdCl<sub>2</sub> fait partie du groupe (a), les concentrations 100 et 200µM CdCl<sub>2</sub> appartiennent au groupe intermédiaire (ab), tandis que le traitement 400µM CdCl<sub>2</sub> fait partie du groupe (b) (**Figure 22**). Ces résultats signifient que le CdCl<sub>2</sub>, diminue d'une manière significative le nombre de feuilles entre 0 et 400µM, c'est dans cet intervalle que se situerait le seuil de sensibilité vis-à-vis le CdCl<sub>2</sub> .

**Tableau 4.** Analyse de la variance du nombre de feuilles des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	1805.000	1805.000	530.8824	0.000000
Var. Facteur 1 (CdCl <sub>2</sub> )	3	40.600	13.533	3.9804	<b>0.027003</b>
Erreur	16	54.400	3.400		
Total	19	95.000			



**Figure 22.** Nombre de feuilles des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>. Les barres représentent la moyenne ± ET (n=10). Les différentes lettres au-dessus des barres indiquent une différence significative à  $P < 0.05$  selon le test de *Tukey*.

### 2.1.2. Longueur de la partie aérienne

Les résultats obtenus montrent que les différentes concentrations de CdCl<sub>2</sub> dans le milieu de culture ont un effet sur la croissance en longueur des parties aériennes chez *A. nummularia* (**Figure 23 et 24**).

L'allongement le plus important a été obtenu pour le traitement (0µM CdCl<sub>2</sub>) avec une valeur de 83mm, cette valeur a été diminuée de 12.8%, 18.6% et 40% pour les traitements respectifs 100, 200 et 400µM CdCl<sub>2</sub>.

Ces résultats sont confirmés par l'analyse de la variance à un seul critère de classification qui montre une différence très significative entre les moyennes de la longueur des parties aériennes pour les différents traitements ( $P < 0,01$ ) (**Tableau 5**).

Le test de *Tukey* au seuil de 5%, fait ressortir deux groupes homogènes. Le premier groupe (a) reflète les moyennes les plus élevées obtenues par les traitements (0 et 100µM CdCl<sub>2</sub>); le deuxième groupe (b) représente la moyenne qui correspond à la concentration 400µM CdCl<sub>2</sub> (**Figure 23**). Le

seuil de sensibilité se situerait dans l'intervalle des concentrations comprises entre 100 et 400 $\mu$ M CdCl<sub>2</sub>.

**Tableau 5.** Analyse de la variance de la longueur de la partie aérienne des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	83592.45	83592.45	409.7669	0.000000
Var. Facteur 1 (CdCl <sub>2</sub> )	3	4206.55	1402.18	6.8734	<b>0.003465</b>
Erreur	16	3264.00	204.00		
Total	19	7470.55			

### 2.1.3. Longueur de la partie racinaire

Les résultats obtenus montrent que le stress métallique induit par les différents traitements de CdCl<sub>2</sub> n'influe pas uniquement sur la croissance en longueur de la partie aérienne mais également celle de la partie racinaire (**Figure 23**).

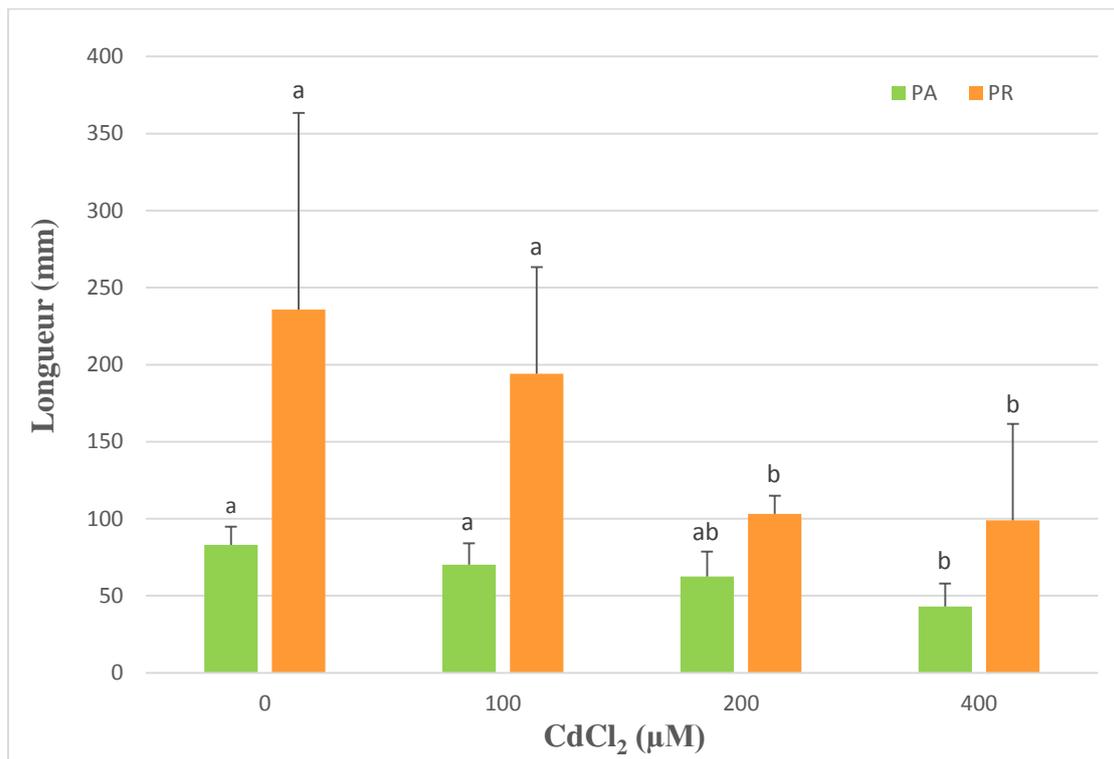
L'allongement le plus important de la partie racinaire a été obtenu pour les traitements (0 et 100 $\mu$ M CdCl<sub>2</sub>) avec des valeurs respectives de 235.8 et 194 mm,

L'analyse de la variance confirme ces résultats en montrant une différence significative entre les moyennes de la longueur des racines ( $P < 0,05$ ) (**Tableau 6**).

Le test de *Tukey* au seuil de 5%, met en évidence une différence significative entre les concentrations 0 et 100 $\mu$ M CdCl<sub>2</sub> qui font partie du groupe (a) et le groupe (b) qui correspond aux concentrations 200 et 400 $\mu$ M CdCl<sub>2</sub> (**Figure 23**). Le seuil de sensibilité se situerait dans l'intervalle des concentrations comprises entre 100 et 200 $\mu$ M CdCl<sub>2</sub>.

**Tableau 6.** Analyse de la variance de la longueur de la partie racinaire des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	499280.0	499280.0	79.50350	0.000000
Var. Facteur 1 (CdCl <sub>2</sub> )	3	69164.4	23054.8	3.67116	<b>0.034733</b>
Erreur	16	100479.6	6280.0		
Total	19	169644.0			



**Figure 23.** Longueur de la partie aérienne (PA) et racinaire (PR) des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  ET (n =10). Les différentes lettres aux dessus des barres indiquent une différence significative à  $P < 0.05$  selon le test de *Tukey*.

#### 2.1.4. Matière fraîche de la partie aérienne

Les résultats obtenus montrent que l'exposition au CdCl<sub>2</sub>, produit un abaissement du poids de la matière fraîche de la partie aérienne (**Figure 25**). Pour la concentration 400µM CdCl<sub>2</sub>, cet abaissement est de l'ordre de 76% par rapport au témoin.

Statistiquement, l'analyse de la variance montre qu'il existe un effet significatif ( $P < 0.05$ ) de la concentration en CdCl<sub>2</sub> sur le poids de la matière fraîche de la partie aérienne (**Tableau 7**).

Le test de *Tukey* au seuil de 5%, fait ressortir deux groupes homogènes. Le premier groupe (a) représente le traitement 0µM CdCl<sub>2</sub>; alors que le second groupe (b) représente les traitements 200µM et 400µM CdCl<sub>2</sub> (**Figure 25**). Le seuil de sensibilité se situerait dans l'intervalle des concentrations comprises entre 0 et 200 µM CdCl<sub>2</sub>.



**Figure 24.** Différence de croissance des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

**Tableau 7.** Analyse de la variance de la matière fraîche de la partie aérienne des plantules d'*Atriplex nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	348585.6	348585.6	48.17340	0.000003
Var. Facteur 1 (CdCl <sub>2</sub> )	3	102333.7	34111.2	4.71406	<b>0.015275</b>
Erreur	16	115777.0	7236.1		
Total	19	218110.6			

### 2.1.5. Matière fraîche de la partie racinaire

Les résultats obtenus montrent que l'application de différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$  ne semble provoquer que de faibles variations dans l'expression de ce paramètre (**Figure 27**).

L'analyse de la variance montre que le  $\text{CdCl}_2$  n'influe pas statistiquement ( $P > 0.05$ ) le poids de la matière fraîche de la partie racinaire (**Tableau 8**).

Le test de *Tukey* au seuil de 5%, fait ressortir un seul groupe homogène (a) qui correspond aux quatre concentrations appliquées.

**Tableau 8.** Analyse de la variance de la matière fraîche de la partie racinaire des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	1389.444	1389.444	53.38012	0.000002
Var. Facteur 1 ( $\text{CdCl}_2$ )	3	267.317	89.106	3.42330	<b>0.422725</b>
Erreur	16	416.468	26.029		
Total	19	683.786			

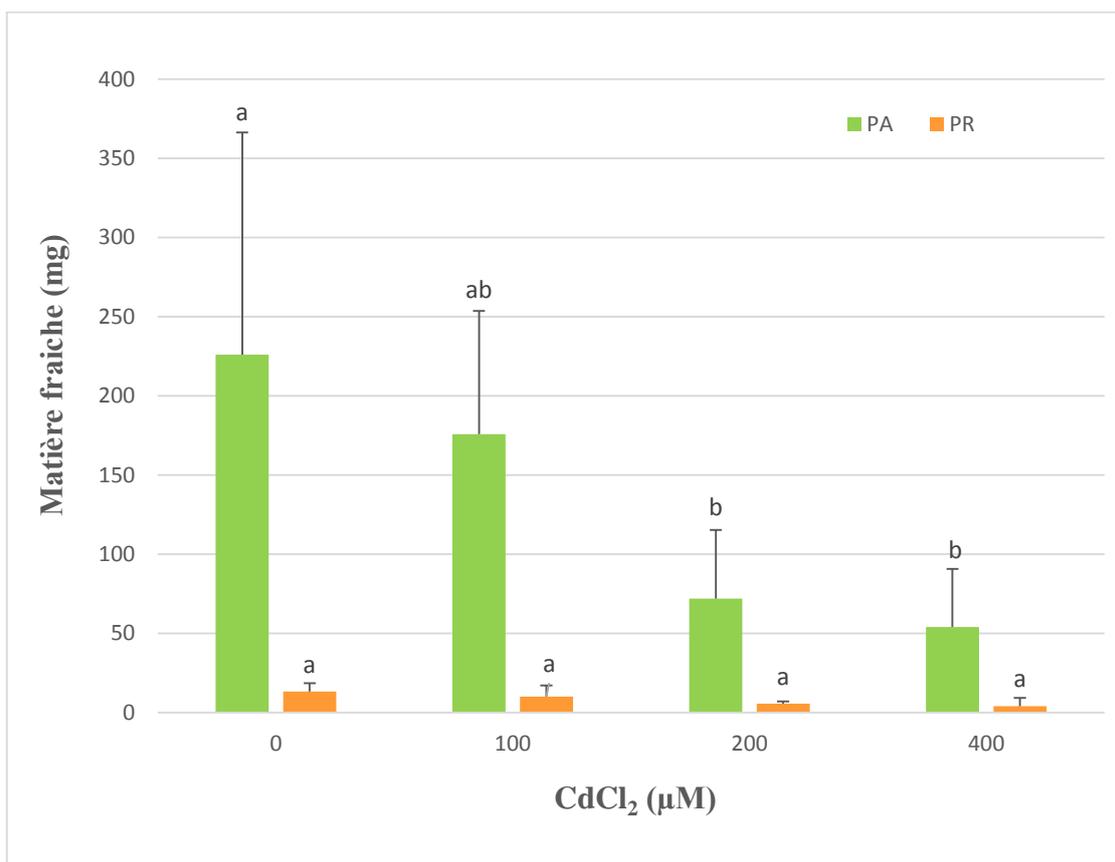
### 2.1.6. Matière sèche de la partie aérienne

Les résultats obtenus montrent que la biomasse sèche aérienne semble répondre négativement aux différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ .

Les résultats dans la **Figure 26** montrent qu'au-delà de  $100\mu\text{M CdCl}_2$ , la biomasse sèche de la partie aérienne diminue significativement par l'augmentation du  $\text{CdCl}_2$  dans le milieu.

L'analyse de la variance confirme ces résultats en montrant une différence significative ( $P < 0,05$ ) de la matière sèche de la partie aérienne entre les différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$  (**Tableau 9**).

Le test de *Tukey* au seuil de 5%, met en évidence une différence significative entre la concentration de  $100\mu\text{M CdCl}_2$  qui fait partie du groupe (a) et le groupe (b) qui correspond aux concentrations 200 et  $400\mu\text{M CdCl}_2$  (**Figure 28**). Le seuil de sensibilité se localise dans l'intervalle des concentrations comprises entre 100 et  $200\mu\text{M CdCl}_2$ .



**Figure 25.** Matière fraîche de la partie aérienne (PA) et racinaire (PR) des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>. Les barres représentent la moyenne ± ET (n =10). Les différentes lettres au-dessus des barres indiquent une différence significative à  $P < 0.05$  selon le test de *Tukey*.

**Tableau 9.** Analyse de la variance de la matière sèche de la partie aérienne des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	1797.408	1797.408	161.9761	0.000000
Var. Facteur 1 (CdCl <sub>2</sub> )	3	138.244	46.081	4.1527	<b>0.023541</b>
Erreur	16	177.548	11.097		
Total	19	315.792			

### 2.1.7. Matière sèche de la partie racinaire

Selon la **Figure 26**, la valeur la plus élevée est obtenue par le traitement 0 $\mu$ M CdCl<sub>2</sub>. Au-delà, le poids de la matière sèche racinaire, diminue progressivement. Cette diminution est de l'ordre de 74% par rapport au témoin pour la concentration la plus stressante (400 $\mu$ M CdCl<sub>2</sub>).

L'analyse de la variance met en évidence une différence significative ( $P < 0,05$ ) entre les différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub> (**Tableau 10**).

Le test de *Tukey* au seuil de 5%, met en évidence une différence significative entre la concentration de 0 $\mu$ M qui appartient au groupe (a) et le groupe (b) qui correspond à une concentration de 400 $\mu$ M (**Figure 26**).

**Tableau 10.** Analyse de la variance de la matière sèche de la partie racinaire des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

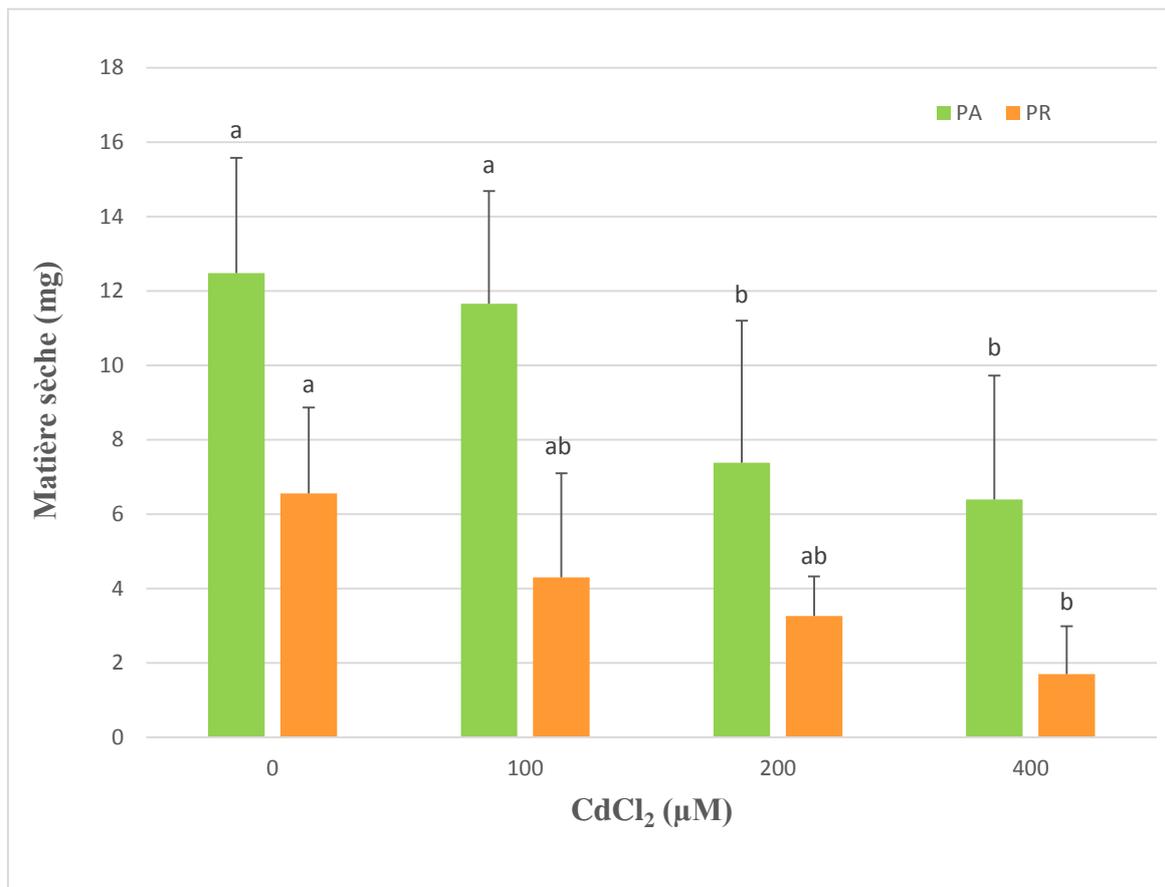
Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	312.8405	312.8405	78.52422	0.000000
Var. Facteur 1 (CdCl <sub>2</sub> )	3	62.3655	20.7885	5.21800	<b>0.010546</b>
Erreur	16	63.7440	3.9840		
Total	19	126.1095			

### 2.1.8. Teneur en eau

L'estimation de la teneur en eau des tissus aériens et racinaires en fonction de la concentration de Cd dans le milieu hydroponique est illustrée par la **Figure 27**.

Les résultats montrent que l'hydratation des organes des plantules d'*A. nummularia*, ne semble pas être affectée par les traitements de CdCl<sub>2</sub>.

L'analyse de la variance montre qu'il existe une différence non significative ( $P > 0,05$ ) entre les différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub> pour la partie aérienne et racinaire (**Tableau 11 et 12**).



**Figure 26.** Matière sèche de la partie aérienne et racinaire des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  ET (n =10). Les différentes lettres aux dessus des barres indiquent une différence significative à  $P < 0.05$  selon le test de Tukey.

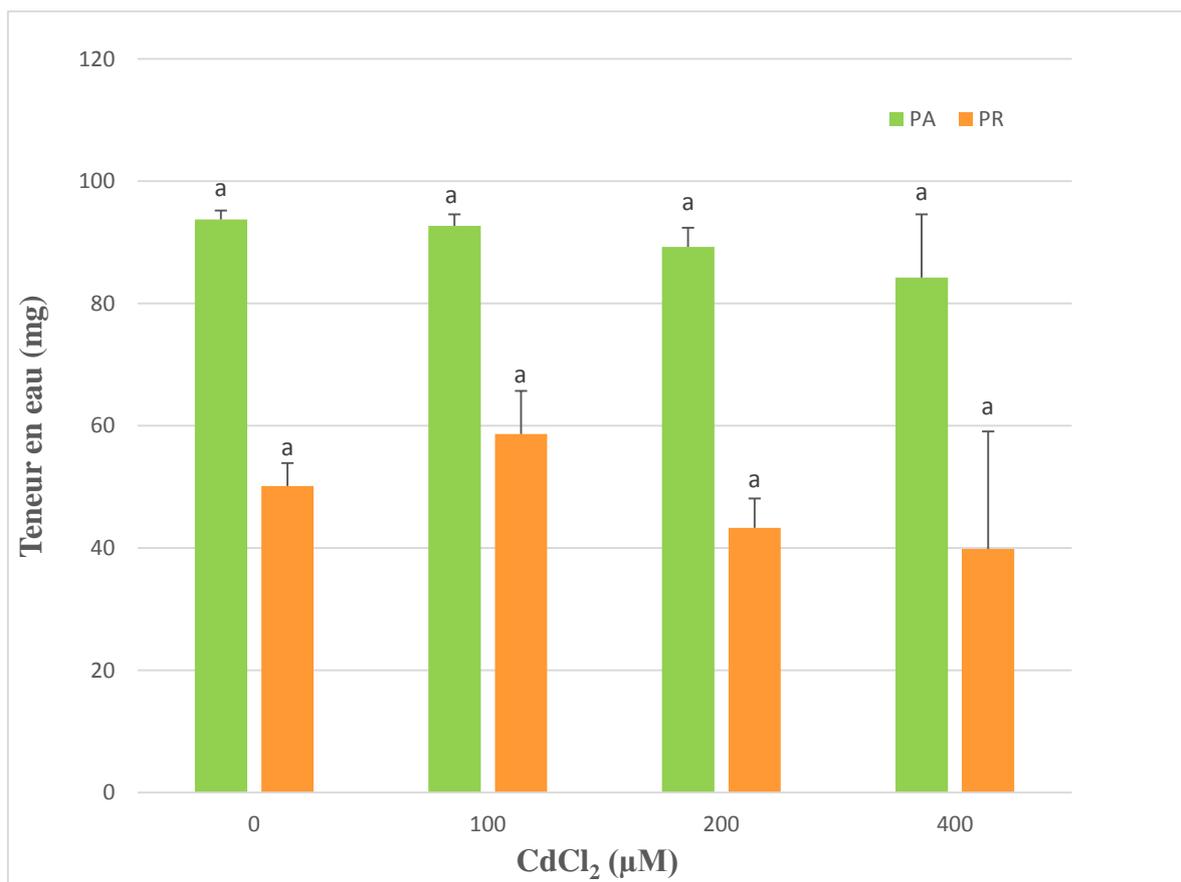
**Tableau 11.** Analyse de la variance de la teneur en eau de la partie aérienne des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	161972.7	161972.7	5297.820	0.000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CdCl}_2$ )	3	274.6	91.5	2.994	<b>0.061884</b>
Erreur	16	489.2	30.6		
Total	19	763.8			

Ces résultats sont confirmés par le classement des traitements en groupes homogènes selon le test de *Tukey* (**Figure 27**), il s'avère que le  $\text{CdCl}_2$  n'affecte pas la teneur en eau de la partie aérienne et racinaire des plantules d'*A. nummularia*. Toutes les concentrations en  $\text{CdCl}_2$  appartiennent au même groupe homogène (a).

**Tableau 12.** Analyse de la variance de la teneur en eau de la partie racinaire des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	46081.26	46081.26	404.1803	0.000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CdCl}_2$ )	3	1032.21	344.07	3.0179	<b>0.060587</b>
Erreur	16	1824.19	114.01		
Total	19	2856.40			



**Figure 27.** Teneur en eau de la partie aérienne (PA) et racinaire (PR) des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  ET (n =10). Les différentes lettres au-dessus des barres indiquent une différence significative à  $P < 0.05$  selon le test de *Tukey*.

## 2.2. La transpiration

La **Figure 28** montre que la transpiration est affectée par le Cd. Elle augmente au fur et à mesure que la concentration en Cd augmente dans la solution nutritive.

Statistiquement, l'analyse de la variance montre que la concentration en CdCl<sub>2</sub> exerce un effet significatif ( $P = 0.05$ ) sur la transpiration des plantules d'*A. nummularia* (**Tableau 13**).

Par ailleurs, le test de *Tukey* au seuil de 5% (**Figure 28**), montre qu'il existe une différence significative entre le groupe (b) qui correspond au témoin et le groupe (a) qui représente le traitement de 400µM CdCl<sub>2</sub>.

**Tableau 13.** Analyse de la variance du taux de transpiration des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

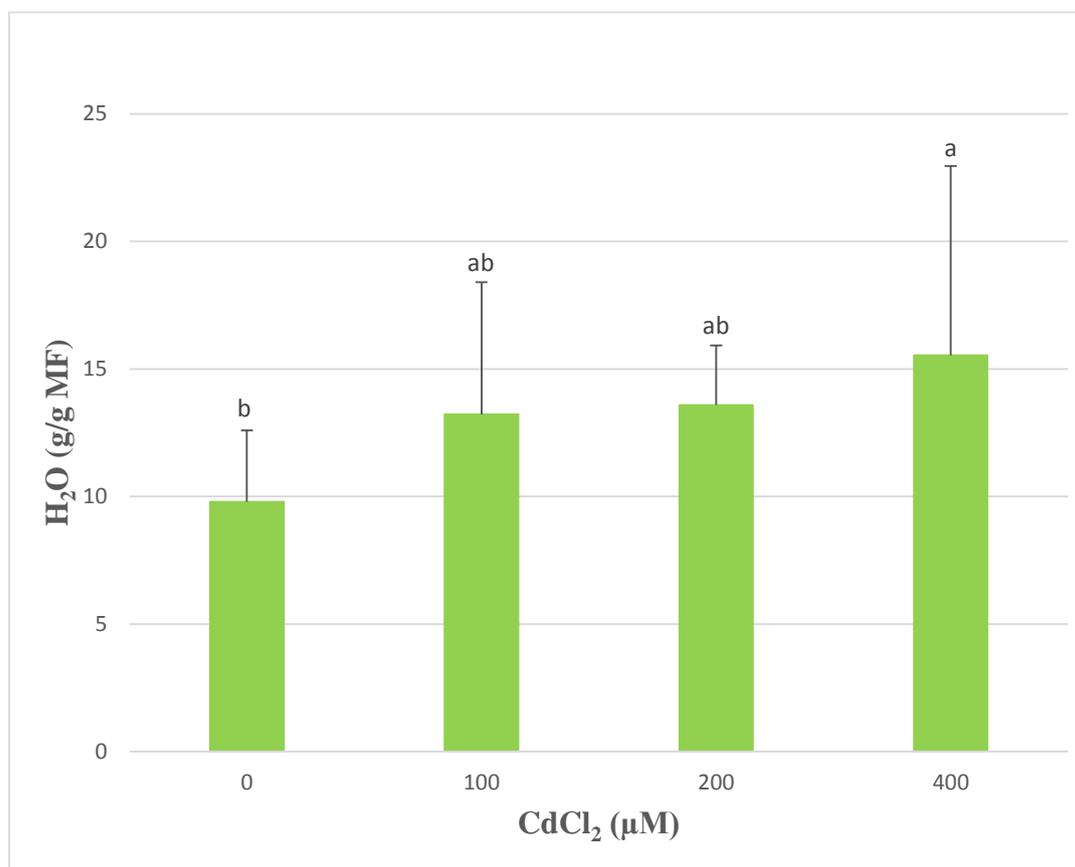
Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	2037.907	2037.907	85.49447	0.000015
Var. Facteur 1 (CdCl <sub>2</sub> )	3	51.286	17.095	0.71719	<b>0.05009</b>
Erreur	8	190.694	23.837		
Total	11	241.980			

## 2.3. Le dosage de la Chlorophylle

Les résultats obtenus montrent que l'application des traitements à CdCl<sub>2</sub>, induit une baisse de la teneur en pigments chlorophylliens (a) et (b). Cette baisse est de l'ordre de 47 % et 45 % pour la chlorophylle (a) et (b) respectivement sous un traitement de 400µM CdCl<sub>2</sub> (**Figure 29**).

Statistiquement, l'analyse de la variance montre qu'il existe un effet très hautement significatif ( $P < 0.001$ ) de la concentration en CdCl<sub>2</sub> sur la teneur en chlorophylle (a) des plantules d'*A. nummularia* (**Tableau 14**).

Selon le test de *Tukey* au seuil de 5% (**Figure 29**), la concentration de 0 µM CdCl<sub>2</sub> est classée dans le groupe (a), le second groupe (c) est formé par le traitement 400µM CdCl<sub>2</sub>. Ces résultats suggèrent que le CdCl<sub>2</sub> diminue d'une façon significative la teneur en chlorophylle (a) entre 0 et 400µM CdCl<sub>2</sub>.



**Figure 28.** Transpiration des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>. Les barres représentent la moyenne ± ET (n = 10). Les différentes lettres au-dessus des barres indiquent une différence significative à  $P < 0.05$  selon le test de Tukey.

**Tableau 14.** Analyse de la variance du taux de chlorophylle (a) des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

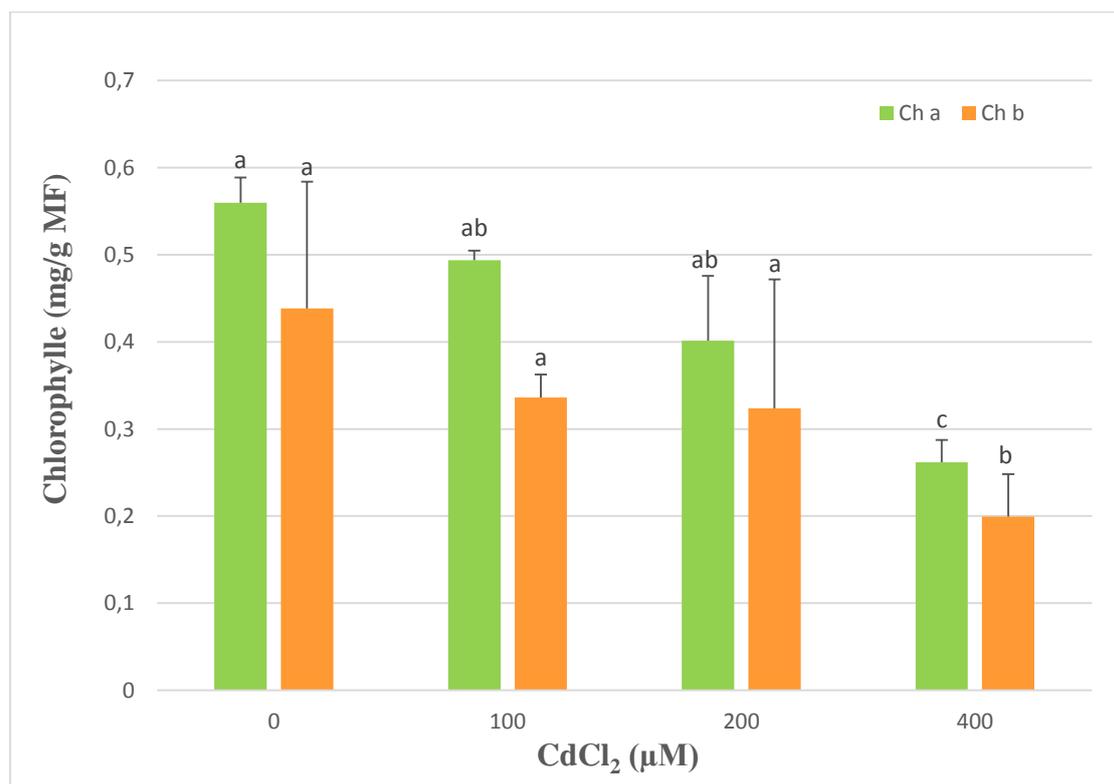
Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	2.210705	2.210705	1235.613	0.000000
Var. Facteur 1 (CdCl <sub>2</sub> )	3	0.150148	0.050049	27.974	<b>0.000136</b>
Erreur	8	0.014313	0.001789		
Total	11	0.164461			

D'autre part, l'analyse de la variance montre qu'il existe un effet significatif ( $P < 0.05$ ) entre les différents traitements appliqués sur la teneur en chlorophylle (b) (**Tableau 15**).

Selon le test de *Tukey*, les concentrations 0, 100 et 200 $\mu$ M CdCl<sub>2</sub> se classent dans le même groupe (a) alors que la concentration 400 $\mu$ M CdCl<sub>2</sub> se trouve dans le groupe (b) (**Figure 29**).

**Tableau 15.** Analyse de la variance du taux de chlorophylle (b) des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	1.263437	1.263437	109.4177	0.000006
Var. Facteur 1 (CdCl <sub>2</sub> )	3	0.086350	0.028783	2.4927	<b>0.013</b>
Erreur	8	0.092375	0.011547		
Total	11	0.178725			



**Figure 29.** Teneur en chlorophylle (a) et (b) des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>. Les barres représentent la moyenne  $\pm$  ET (n = 10). Les différentes lettres au-dessus des barres indiquent une différence significative à  $P < 0.05$  selon le test de *Tukey*.

#### 2.4. Le dosage de la proline

Selon la **Figure 30**, l'exposition aux différents traitements de CdCl<sub>2</sub>, induit une accumulation significative de proline dans les feuilles des plantules d'*A. nummularia*.

Statistiquement, l'analyse de la variance montre qu'il existe un effet très hautement significatif ( $P < 0.001$ ) de la concentration en CdCl<sub>2</sub> sur la teneur proline des feuilles des plantules d'*A. nummularia* (**Tableau 16**).

Le test de *Tukey* au seuil de 5% (**Figure 30**), classe les traitements 0 et 100 µM CdCl<sub>2</sub> dans le groupe (c), le second groupe (b) est formé par le traitement 200µM CdCl<sub>2</sub> et la concentration de 400µM CdCl<sub>2</sub> est représentée par le groupe (a). Ce résultat signifie que le cadmium affecte d'une manière significative la teneur en proline au niveau de la partie aérienne entre 100 et 200µM CdCl<sub>2</sub>.

**Tableau 16.** Analyse de la variance du taux de proline des tissus de la partie aérienne des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

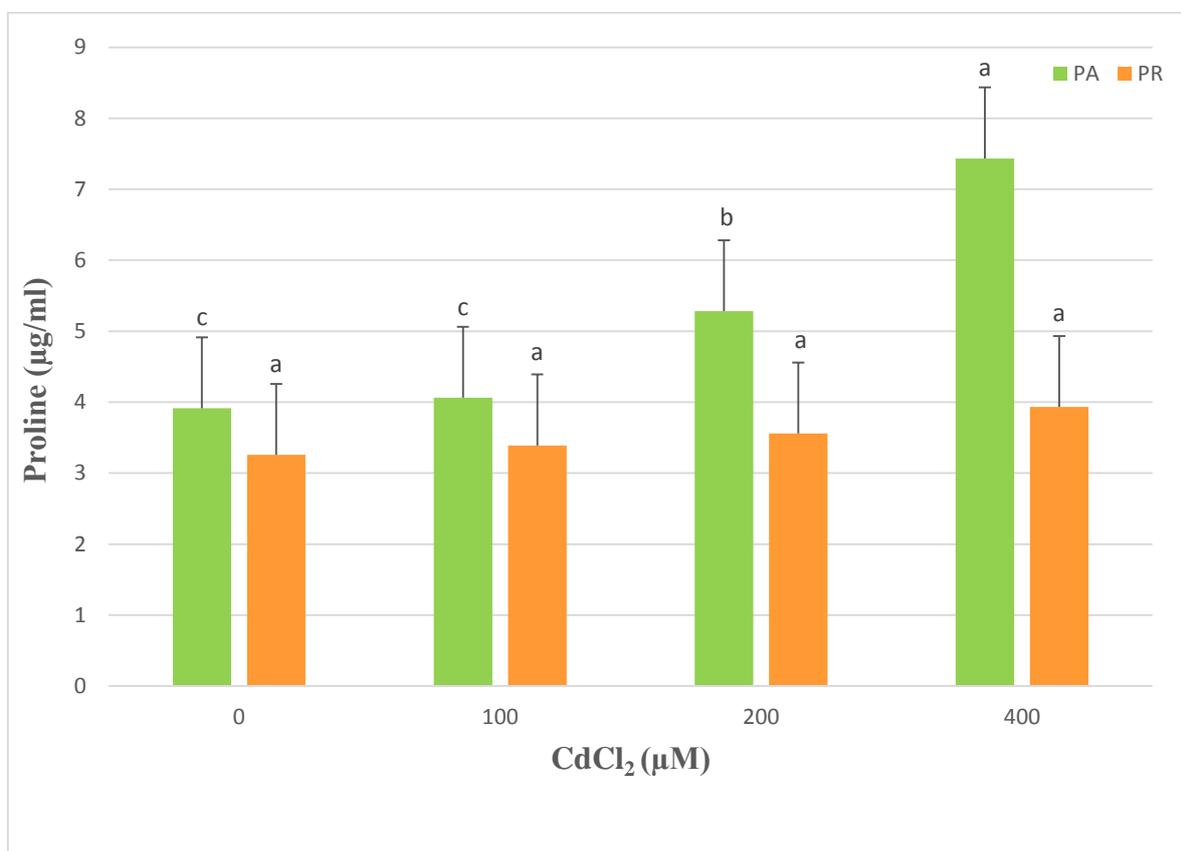
Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	321.1466	321.1466	1919.851	0.000000
Var. Facteur 1 (CdCl <sub>2</sub> )	3	23.8256	7.9419	47.477	<b>0.000019</b>
Erreur	8	1.3382	0.1673		
Total	11	25.1639			

Par contre, l'application des différentes concentrations en Cd, ne produit aucun changement significatif de la teneur en proline dans la partie racinaire des plantules d'*A. nummularia* ( $P > 0.05$ ) (**Tableau 17**).

Le test de *Tukey* au seuil de 5%, révèle que tous les traitements se classent au même groupe homogène (a) (**Figure 30**).

**Tableau 17.** Analyse de la variance du taux de proline des tissus de la partie racinaire des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	149.9245	149.9245	1313.422	0.000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CdCl}_2$ )	3	0.7688	0.2563	2.245	<b>0.160354</b>
Erreur	8	0.9132	0.1141		
Total	11	1.6820			



**Figure 30.** Teneur en proline dans la partie aérienne (PA) et racinaire (PR) des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  ET (n =10). Les différentes lettres au-dessus des barres indiquent une différence significative à  $P < 0.05$  selon le test de Tukey.

## 2.5. Le dosage ionique

### 2.5.1. La teneur en cadmium

Les teneurs en Cd dans les parties aériennes et racinaires d'*A. nummularia* augmentent en fonction de l'accroissement des doses de CdCl<sub>2</sub> dans la solution nutritive. Les niveaux d'accumulation du métal restent maintenus à des valeurs beaucoup plus élevées dans les parties aériennes que dans les parties racinaires, et ceci pour toutes les concentrations utilisées (**Figure 31**).

L'analyse de la variance montre qu'il existe un effet très hautement significatif ( $P < 0.001$ ) de la teneur en Cd de la partie aérienne et racinaire ( $P < 0.001$ ) entre les différents traitements de CdCl<sub>2</sub> (**Tableau 18 et 19**).

Pour la partie aérienne et d'après le classement des traitements en groupes homogènes selon le test de *Tukey* (**Figure 31**), il s'avère que le CdCl<sub>2</sub> affecte d'une manière significative l'accumulation du Cd entre les différentes concentrations, il permet de classer la concentration 0µM CdCl<sub>2</sub> dans le groupe (d), la concentration 100µM CdCl<sub>2</sub> dans le groupe (c), le groupe (b) correspond à la concentration 200µM CdCl<sub>2</sub>, alors que la concentration 400µM CdCl<sub>2</sub> est classée dans le groupe (a).

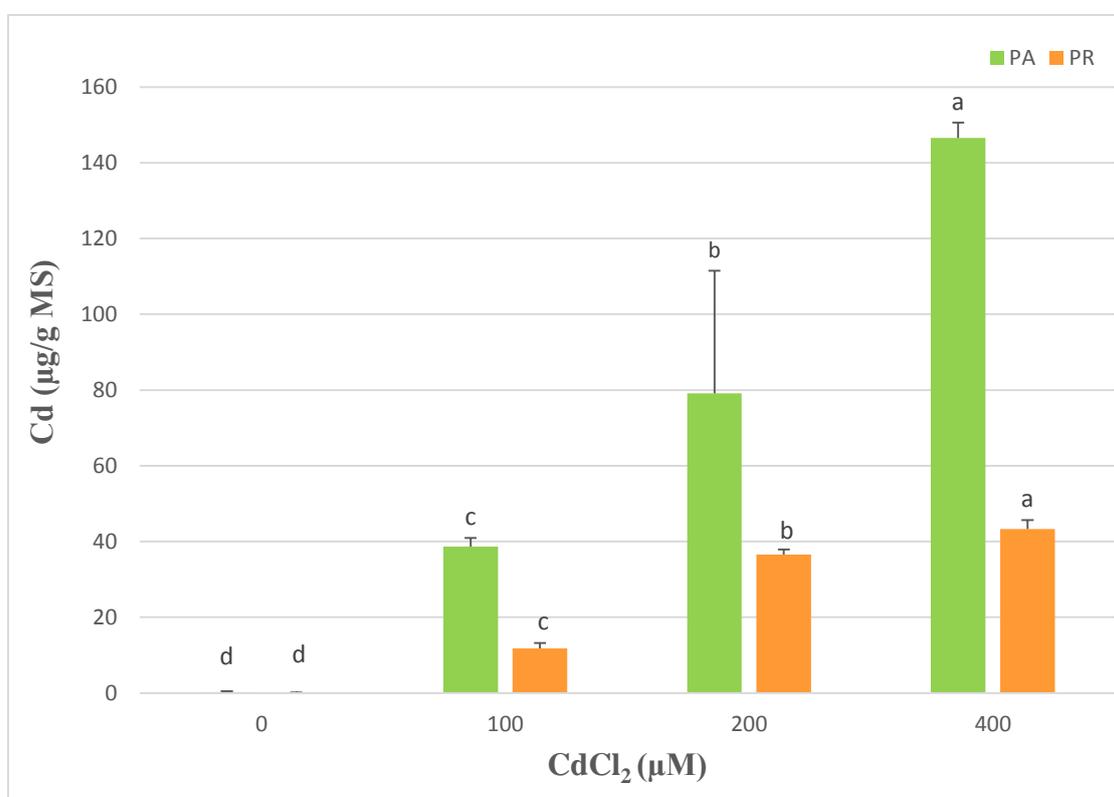
**Tableau 18.** Analyse de la variance du taux de Cd des tissus de la partie aérienne des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	52487.89	52487.89	196.4284	0.000001
Var. Facteur 1 (CdCl <sub>2</sub> )	3	35227.02	11742.34	43.9440	<b>0.000026</b>
Erreur	8	2137.69	267.21		
Total	11	37364.71			

D'autre part, le test de *Tukey* (**Figure 31**) révèle que pour la partie racinaire, le témoin présente la plus faible teneur en Cd et se classe dans le groupe (d), le traitement 100 et 200µM CdCl<sub>2</sub> se classent dans les groupes (c) et (b) respectivement, tandis que la teneur la plus élevée est enregistrée au traitement 400µM CdCl<sub>2</sub> qui appartient au groupe (a).

**Tableau 19.** Analyse de la variance du taux de Cd des tissus de la partie racinaire des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	6304.887	6304.887	2581.873	0.000000
Var. Facteur 1 ( $\text{CdCl}_2$ )	3	3732.086	1244.029	509.434	<b>0.000001</b>
Erreur	8	19.536	2.442		
Total	11	3751.622			



**Figure 31.** Teneur en  $\text{Cd}^{2+}$  dans la partie aérienne (PA) et racinaire (PR) des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  ET (n =10). Les différentes lettres au-dessus des barres indiquent une différence significative à  $P < 0.05$  selon le test de *Tukey*.

### 2.5.1.1. Facteur de translocation (TF)

Le facteur de translocation indique l'efficacité de la translocation des métaux, des racines vers la partie aérienne (Padmavathiamma et Li, 2007). Les résultats obtenus montrent que pour toutes les concentrations appliquées, le TF est supérieur à 1 (**Tableau 20**).

### 2.5.1.2. Coefficient de bioaccumulation (BAC)

Le facteur de bioaccumulation indique la capacité des plantes à accumuler les métaux, du milieu environnant vers ses tissus (Ladislas et al., 2012). Les résultats obtenus montrent que le BAC n'as pas dépassé le 1 et ceci pour toutes les concentrations testées (**Tableau 21**).

**Tableau 20.** Les valeurs des TF en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

(Les valeurs représentent les moyennes  $\pm$  incertitude)

Concentration	TF $\pm$ SE
0 $\mu$ M	2,59 $\pm$ 1,68
100 $\mu$ M	3,29 $\pm$ 0,15
200 $\mu$ M	2,16 $\pm$ 0,50
400 $\mu$ M	3,39 $\pm$ 0,06

**Tableau 21.** Les valeurs des BAC en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

(Les valeurs représentent les moyennes  $\pm$  incertitude)

Concentration	BAC $\pm$ SE
0 $\mu$ M	0 $\pm$ 0
100 $\mu$ M	0,38 $\pm$ 0,013
200 $\mu$ M	0,39 $\pm$ 0,09
400 $\mu$ M	0,36 $\pm$ 0,005

### 2.5.2. La teneur en fer

Les teneurs en Fe des plantules d'*A. nummularia* manifestent une baisse avec l'augmentation de la concentration du CdCl<sub>2</sub> (**Figure 32**). Les teneurs les plus importantes sont enregistrées au niveau de la partie racinaire.

L'analyse de la variance montre que cette diminution dans la partie aérienne est significative entre les différents traitements de CdCl<sub>2</sub> ( $P < 0.05$ ) (**Tableau 22**).

Le test de *Tukey* au seuil de 5% (**Figure 32**), révèle que ce métal affecte particulièrement l'assimilation du fer entre les concentrations de 0 et 100 µM CdCl<sub>2</sub>.

**Tableau 22.** Analyse de la variance du taux de Fe des tissus de la partie aérienne des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

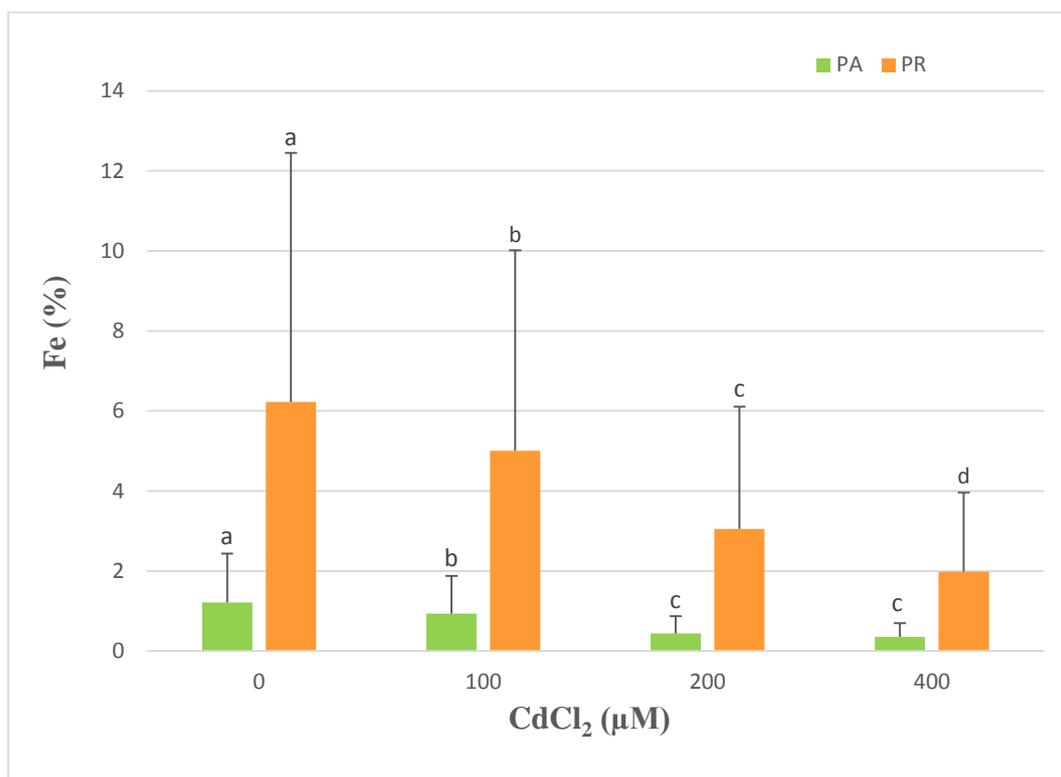
Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	6.479515	6.479515	46.84733	0.000132
Var. Facteur 1 (CdCl <sub>2</sub> )	3	1.533660	0.511220	3.69616	<b>0.00618</b>
Erreur	8	1.106490	0.138311		
Total	11	2.640151			

D'autre part, l'analyse de la variance montre que la teneur en Fe de la partie racinaire présente une différence significative entre les différents traitements ( $P < 0.05$ ) (**Tableau 23**).

Le test de *Tukey* au seuil de 5% (**Figure 32**), classe la concentration 0µM CdCl<sub>2</sub> dans le groupe (a), la concentration de 100µM CdCl<sub>2</sub> est représentée par le groupe (b), alors que les concentrations 200 et 400 µM CdCl<sub>2</sub> appartiennent aux groupes (c) et (d) respectivement.

**Tableau 23.** Analyse de la variance du taux de Fe des tissus de la partie racinaire des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>.

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	198.3922	198.3922	80.69977	0.000019
Var. Facteur 1 (CdCl <sub>2</sub> )	3	32.7764	10.9255	4.44414	<b>0.040686</b>
Erreur	8	19.6672	2.4584		
Total	11	52.4436			



**Figure 32.** Teneur en  $\text{Fe}^{2+}$  de la partie aérienne (PA) et racinaire (PR) des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  ET ( $n=10$ ). Les différentes lettres au-dessus des barres indiquent une différence significative à  $P < 0.05$  selon le test de *Tukey*.

### 2.5.3. La teneur en calcium

Les teneurs en  $\text{Ca}^{2+}$  montrent une diminution significative avec les différents traitements en Cd, mais ces teneurs restent toujours plus élevées dans la partie aérienne que racinaire (**Figure 33**).

L'analyse de la variance montre qu'il existe un effet significatif ( $P < 0.05$ ) de la concentration en  $\text{CdCl}_2$  sur la teneur en  $\text{Ca}^{2+}$  au niveau de la partie aérienne et racinaire (**Tableau 24 et 25**).

Pour la partie aérienne, le test de *Tukey* (**Figure 33**) indique que le traitement 0  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2$  est classé dans le premier groupe (a), le groupe (b) correspond aux concentrations 100 et 200  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2$  et le groupe (c) correspond à la concentration 400  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2$ .

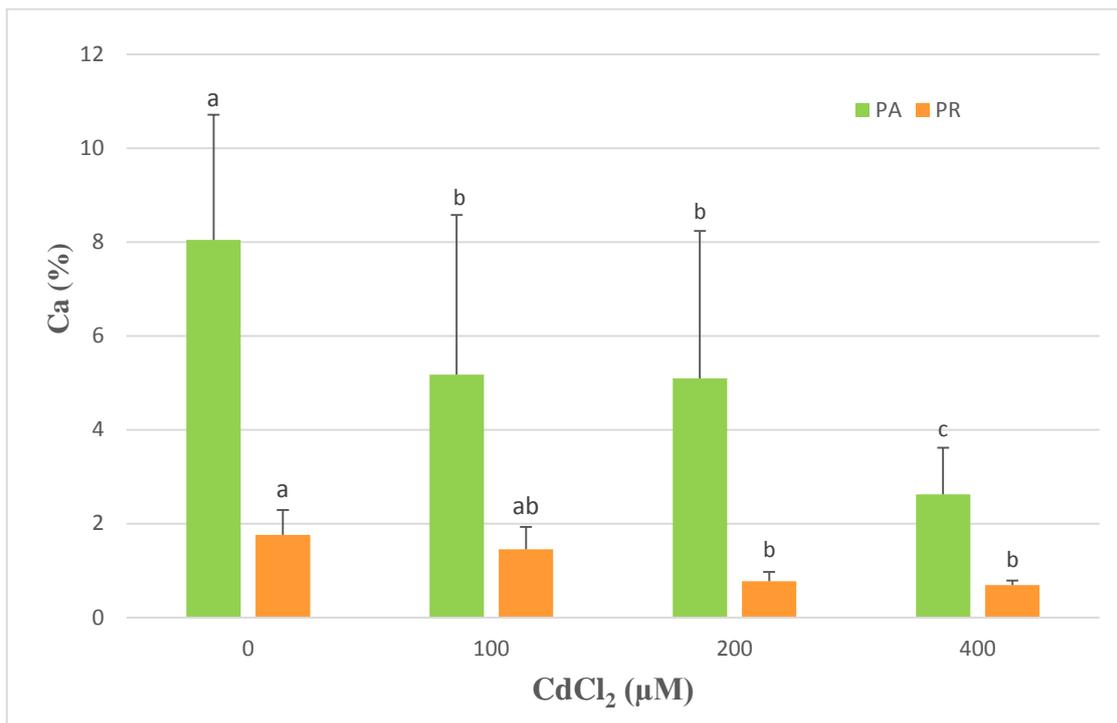
**Tableau 24.** Analyse de la variance du taux de  $\text{Ca}^{2+}$  des tissus de la partie aérienne des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	328.7965	328.7965	44.59410	0.000156
Var. Facteur 1 ( $\text{CdCl}_2$ )	3	44.2441	14.7480	2.00025	<b>0.019262</b>
Erreur	8	58.9848	7.3731		
Total	11	103.2288			

Selon le test de *Tukey* au seuil de 5%, le  $\text{CdCl}_2$  affecte de façon significative la teneur du  $\text{Ca}^{2+}$  de la partie racinaire entre la concentration  $0\mu\text{M}$  de qui appartient au groupe (a), et la concentration  $200\mu\text{M}$  qui correspond au groupe (b) (**Figure33**).

**Tableau 25.** Analyse de la variance du taux de  $\text{Ca}^{2+}$  des tissus de la partie racinaire des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	16.42549	16.42549	118.7706	0.000004
Var. Facteur 1 ( $\text{CdCl}_2$ )	3	2.44023	0.81341	5.8817	<b>0.020177</b>
Erreur	8	1.10637	0.13830		
Total	11	3.54659			



**Figure 33.** Teneur en  $\text{Ca}^{2+}$  de la partie aérienne (PA) et racinaire (PR) des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $\text{CdCl}_2$ . Les barres représentent la moyenne  $\pm$  ET (n =10). Les différentes lettres au-dessus des barres indiquent une différence significative à  $P < 0.05$  selon le test de *Tukey*.

#### 2.5.4. La teneur en potassium

Les résultats obtenus montrent que la présence de  $\text{CdCl}_2$  dans le milieu affecte l'absorption du  $\text{K}^+$  au niveau de la partie aérienne et racinaire. En effet la teneur de ce dernier diminue avec l'augmentation de la concentration de  $\text{CdCl}_2$ .

Les résultats de l'analyse de la variance montrent qu'il existe une différence significative entre les différents traitements du  $\text{CdCl}_2$  sur l'accumulation du  $\text{K}^+$  au niveau de la partie aérienne et racinaire ( $P < 0.05$ ) (**Tableau 26** et **Tableau 27**).

Le test de *Tukey* (**Figure 34**), classe les traitements 0 et 100  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2$  dans le groupe (a) et (b) respectivement, alors que la concentration de 400 $\mu\text{M}$  est représentée par le groupe (c). Ce résultat signifie que ce métal affecte d'une manière significative la teneur en  $\text{K}^+$  au niveau de la partie aérienne entre 0 et 100 $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2$ .

**Tableau 26.** Analyse de la variance du taux de  $K^+$  des tissus de la partie aérienne des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $CdCl_2$ .

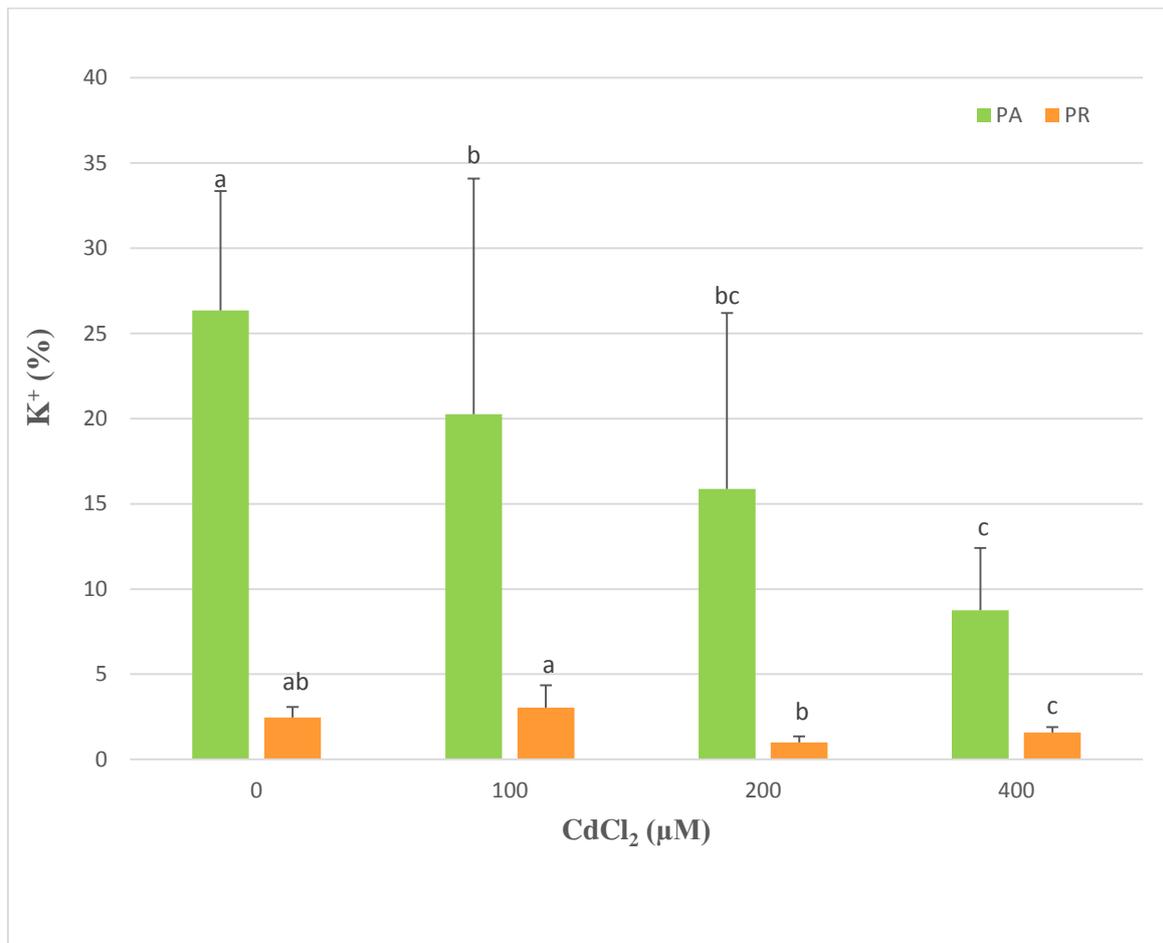
Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	3804.882	3804.882	42.20560	0.000189
Var. Facteur 1 ( $CdCl_2$ )	3	493.895	164.632	1.82617	<b>0.022045</b>
Erreur	8	721.209	90.151		
Total	11	1215.104			

Les teneurs en  $K^+$  obtenues au niveau de la partie racinaire présentent des valeurs comparables pour les traitements 0 et 100  $\mu M$   $CdCl_2$ , à partir de cette concentration ces teneurs diminuent avec l'augmentation de  $CdCl_2$  dans le milieu.

Le test de *Tukey* (**Figure 34**) classe les concentrations en  $CdCl_2$  comme suit ; la concentration 100 $\mu M$   $CdCl_2$  appartient au groupe (a), la concentration 200 $\mu M$   $CdCl_2$  correspond au groupe (b) alors que la concentration 400 $\mu M$   $CdCl_2$  est classée dans le groupe (c).

**Tableau 27.** Analyse de la variance du taux de  $K^+$  des tissus de la partie racinaire des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en  $CdCl_2$ .

Effet	DDL	S.C.E	C.M	Test F	P
Ordre origine	1	49.04119	49.04119	83.67466	0.000016
Var. Facteur 1 ( $CdCl_2$ )	3	7.37658	2.45886	4.19533	<b>0.046545</b>
Erreur	8	4.68875	0.58609		
Total	11	12.06533			



**Figure 34.** Teneur en K<sup>+</sup> de la partie aérienne (PA) et racinaire (PR) des plantules d'*A. nummularia* en fonction des différentes concentrations en CdCl<sub>2</sub>. Les barres représentent la moyenne ± ET (n =10). Les différentes lettres au-dessus des barres indiquent une différence significative à  $P < 0.05$  selon le test de *Tukey*.

## Discussion

### I. Le test germinatif

La germination est la première étape de la vie d'une plante et elle est considérée comme le processus physiologique le plus sensible. Il est contrôlé par des interactions hormonales et des facteurs environnementaux, biotiques et abiotiques tels que la présence d'un excès de métaux (Moosavi et al 2012).

Les effets des métaux sur la germination dépendent de leur capacité à atteindre les tissus embryonnaires à travers les enveloppes de la graine et de leurs propriétés physicochimiques (Márquez-García et al., 2013). Certains métaux comme le Cd et le Cu ont été décrits pour leur capacité à inhiber l'absorption de l'eau et donc la germination ne se produit pas (Kranner et Colville, 2011).

Les résultats obtenus sur la germination des graines d'*A. nummularia* en présence du cadmium, montrent que parmi les concentrations testées, seule la dose de 100µM CdCl<sub>2</sub> permet d'obtenir un taux de germination proche de celui du témoin. A partir de cette concentration, le métal diminue le taux de germination d'une manière significative et provoque un retard de la germination pour les concentrations les plus stressantes.

Nos résultats corroborent avec ceux obtenus par Liu et al. (2012) qui ont étudié l'influence du Cd sur la germination de *Suaeda salsa*. L'étude a permis de mettre en évidence une diminution significative du taux de germination qui varie de 88% à 18% en fonction de la concentration du Cd dans le milieu. Ils ont montré que la présence du Cd semble empêcher l'absorption de l'eau et son mouvement dans l'embryon.

De même, Moussavou Moudouma (2010), a montré une diminution du taux de germination des graines d'*Arabidopsis thaliana* en fonction des concentrations croissantes en CdCl<sub>2</sub> allant de 0 à 500 µM. La diminution du taux de germination est significative à partir de 100 µM de cadmium avec une germination de 47,7 % des graines contre 83,8 % pour le témoin. Avec 500 µM de Cd, le taux de germination chute à 16,6 %.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que le taux et la vitesse de germination sont affectés par les concentrations croissantes du CdCl<sub>2</sub>. Le seuil de sensibilité à ce métal se situe à plus de 100µM.

## II. La croissance

Le nombre de feuilles des plantules d'*A. nummularia*, n'est pas affecté de manière significative par le CdCl<sub>2</sub> qu'au-delà de 200µM. Skrebsky et al. (2008), ont montré que chez *Pfaffia glomerata* le nombre de feuilles par plante était légèrement mais pas significativement réduit par les traitements en Cd jusqu'à 40µM, tandis qu'à 80µM, il a été diminué de 26% par rapport au témoin.

Les résultats obtenus par Lutts et al. (2004), montrent qu'après 3 semaines de traitement, le Cd n'a aucun effet sur le nombre des feuilles des plantules d'*A. halimus*.

La présente étude montre que la croissance de la partie aérienne et racinaire des plantules d'*A. nummularia*, présente une diminution significative avec l'augmentation de la concentration en CdCl<sub>2</sub>.

Ces résultats se confirment par les travaux de Gu et al. (2007), qui indiquent que l'impact du CdCl<sub>2</sub> sur quatre cultivars du genre *Populus*, s'exprime essentiellement par une réduction de la longueur de la tige et de la racine pour tous les traitements appliqués.

De même Ben Youssef et al. (2005), ont montré que le traitement des plantules de colza (*Brassica napus*) cultivées sur milieu nutritif de base, avec des doses croissantes de CdCl<sub>2</sub>, entraîne une réduction de la croissance qui se fait sentir dès la première dose de cadmium employée (5 µM), et ceci s'observe aussi bien au niveau des racines qu'au niveau de la partie aérienne. L'inhibition de la croissance s'accroît davantage à la plus forte dose de CdCl<sub>2</sub> (50 µM), puisque la chute de la biomasse atteint 55,4 et 67,2% respectivement pour les racines et la partie aérienne.

Nedjimi et Daoud (2009b), ont étudié l'effet du Cd sur la croissance, la proline et la conductivité hydraulique chez *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii*. Leurs résultats obtenus montrent que la croissance de la partie aérienne et racinaire diminue significativement avec l'augmentation des concentrations en CdCl<sub>2</sub>. Mêmes résultats ont été obtenus chez *A. halimus* (Lutts et al., 2004) et *Sesuvium portulacastrum* (Ghnaya et al., 2007b).

Selon Sharma et Dubey (2005), l'inhibition de la croissance de la partie aérienne des plantes en présence des métaux lourds peut être due à une diminution de la photosynthèse, une diminution de la nutrition minérale et du statut hydrique, des changements du statut hormonal et enfin à une destruction de la membrane et de sa perméabilité, tandis que l'inhibition de la croissance de la partie racinaire peut être due à une diminution de l'absorption de calcium conduisant à la réduction de la division cellulaire ou bien de l'élongation cellulaire (Eun et al., 2000).

Selon Poschenrieder et al. (1989), la réduction de la production de biomasse chez les plantes en présence de Cd dans le milieu de culture serait due à une perte de la turgescence cellulaire, et d'une carence nutritionnelle induite par le métal (Sanita Di Toppi et al., 1999).

Cette étude montre que les plantules d'*A. nummularia* présentent des diminutions de la biomasse fraîche et sèche des parties aériennes et racinaires en fonction des concentrations croissantes en  $\text{CdCl}_2$ .

Ces résultats confirment ceux obtenus par Bankaji et al. (2015), qui ont rapporté dans leur travail réalisé sur des plantules de *Suaeda fruticosa* cultivées sur une solution nutritive en présence de  $400 \mu\text{M CdSO}_4$  pendant 30 jours, que la production de biomasse a été diminuée de manière significative. Cette diminution varie de 7962 à 1362 mg PF et de 1323 à 377 mg PF respectivement pour les feuilles et les racines.

En outre, Sai Kachout et al. (2009) ont observé que la croissance de deux halophytes, *Atriplex hortensis* et *Atriplex rosea*, a été diminuée à la suite d'un stress cadmique ( $400 \mu\text{M}$ ).

Nos résultats sont également conformes à ceux obtenus par Bankaji et al. (2014) qui ont mis en évidence une diminution de la production de la biomasse chez deux halophytes (*Atriplex halimus* et *Suaeda fruticosa*) traitées avec  $400 \mu\text{M CdSO}_4$ . Cette diminution est de l'ordre de 40% et 80% de PS par rapport au témoin pour les deux espèces respectivement.

Les résultats obtenus par Nedjimi (2009), ont montré que la croissance pondérale de la partie aérienne et racinaire des plantules d'*A. halimus*, se trouve sévèrement diminuée en présence de  $400 \mu\text{M CdCl}_2$  dans le milieu de culture. Cette diminution peut atteindre au niveau de la matière fraîche jusqu'à 77 et 70% par rapport au témoin respectivement pour la partie aérienne et racinaire, alors que pour la matière sèche cette réduction est de l'ordre de 56 et 51% respectivement pour la partie aérienne et racinaire.

Une autre étude sur des plantules d'*Hydrilla verticillata* L., soumises à différentes concentrations en métaux lourds ( $\text{CdCl}_2$ ,  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{ZnSO}_4$  et  $\text{K}_2\text{CrO}_7$ ), montre que la biomasse fraîche et sèche des plantules diminue avec l'augmentation des concentrations des métaux dans le milieu (Panda et Khan, 2004).

Après 15 jours de traitement, le Cd ( $100 \mu\text{M}$ ) réduit d'une façon significative la masse de la matière sèche chez *Mesembryanthemum crystallinum* de 70 % et chez *Sesuvium portulacastrum* de 40 % par rapport au témoin (Ghnaya et al., 2007a).

Wójcik et al. (2005), ont montré que l'exposition au Cd (500 $\mu$ M) des plantules de *Thlaspi caerulescens*, a entraîné une réduction significative de leur matière fraîche de 32% par rapport au témoin.

D'après nos résultats, on a constaté que le cadmium ne semble pas affecter la teneur en eau des plantules d'*A. nummularia*, la variation entre les différents traitements est non significative.

Ce résultat confirme ce qu'ont observé Lutts et al. (2004), qui ont montré que sous un traitement de CdCl<sub>2</sub>, des plantules d'*A. halimus* ne présentent aucun changement significatif de la teneur en eau de la partie aérienne et racinaire (valeurs moyennes de 92,3 et 84,2%, respectivement).

Ce résultat s'oppose à d'autres études qui ont montré que le Cd modifie la teneur en eau des plantes telles que celle de Ben Youssef et al. (2005), qui ont observé que la teneur en eau des tissus de la partie aérienne des plantules de colza présente une diminution de la teneur en eau, dont l'importance est fonction de la concentration du Cd. Par contre, les racines montrent une légère tendance à la baisse de leur degré d'hydratation. Il en résulte que les racines restent toujours les organes les plus hydratés et que la partie aérienne est apparemment davantage affectée par le métal.

Concernant la transpiration, nos résultats montrent que la présence du Cd dans le milieu de culture, augmente la transpiration des plantules d'*A. nummularia*. Ce résultat suggère que la translocation des métaux est conduite principalement par le flux d'eau des racines vers les feuilles assuré par la transpiration (Salt et al., 1995). Ce qui explique l'existence de la majeure partie du Cd et d'autres éléments (Fe, Ca et K) dans les parties aériennes des plantules.

Plusieurs travaux se sont intéressés à l'effet du stress métallique sur la teneur en chlorophylles (a) et (b) chez les plantes (Yang et al., 2011 ; Tapia et al., 2013 ; Kaznina et Titov, 2014 ; Moradi et Ehsanzadeh, 2015).

Le dosage de la chlorophylle des feuilles d'*A. nummularia* soumises au stress cadmique, montre que les teneurs en chlorophylle (a) et (b) régressent en présence du cadmium dans le milieu.

Nos résultats sont conformes à ceux de Ben Ghnaya et al. (2009), qui ont observé que les teneurs en chlorophylle (a) et (b) et en caroténoïde chez quatre cultivars de *Brassica napus* L., ont été diminuées chez les plantes traitées au Cd par rapport aux plantes témoins.

Afin d'étudier l'adaptation d'*A. halimus* et de *Suaeda fruticosa* au stress métallique, une expérience a été menée au laboratoire sur des plantules de ces espèces traitées avec CdSO<sub>4</sub> (400 µM), CuSO<sub>4</sub> (400µM) ou NaCl (200 mM). Les résultats obtenus ont montré que la concentration en chlorophylle totale a été significativement diminuée dans les feuilles des deux espèces jusqu'à 66.4% et 63.7% respectivement (Bankaji et al., 2014).

Le même résultat a été obtenu par Nedjimi (2009), qui a observé qu'après 15 jours de traitement des plantules d'*A. halimus* par une dose de 400µM CdCl<sub>2</sub>, des symptômes visuels de blanchiment des feuilles dans la région des grandes nervures sont constatés sur ces plantes. De même, le contenu en chlorophylle (a) et (b) diminue fortement en présence d'une dose sévère de cadmium, cette diminution est de l'ordre de 63 et 61% par rapport au témoin respectivement pour la chlorophylle (a) et (b).

Nos résultats sont également conformes à ceux obtenus par Mishra et al. (2014), qui ont montré que le contenu en pigments chlorophylliens (a et b, total et caroténoïde) des plantes d'Ashwagandha (*Withania somnifera*) diminue progressivement au-delà de la concentration 50µM CdCl<sub>2</sub> jusqu'à l'obtention des plus faibles teneurs pour les concentrations de 200 et 300µM.

Selon Mishra et Prakash (2010), cette réduction peut être due à plusieurs raisons telles que la destruction de la membrane des chloroplastes par la peroxydation des lipides en raison du manque des antioxydants tels que les caroténoïdes ou à l'augmentation de l'activité peroxydasique.

D'après Stobart et al. (1985), cette régression de la teneur en chlorophylle des plantes soumises au stress métallique peut être due à l'inhibition de l'action des enzymes responsables de la biosynthèse de la chlorophylle (telles que acide δ d-aminolevulinic déshydratase et protochlorophyllide reductase), ou encore à l'inhibition de l'absorption et du transport d'autres éléments comme le Mn, le Zn et le Fe par l'effet antagonisme (John et al., 2009).

La proline est considérée comme faisant partie d'un syndrome adaptatif général aux conditions environnementales défavorables (Nedjimi, 2013). Différentes fonctions sont attribuées à l'accumulation de ce soluté compatible : osmorégulation, chélation et détoxification des métaux, protection des enzymes, régulation de l'acidité cytosolique, stabilisation de la machinerie de la synthèse protéique et piégeage des espèces réactives de l'oxygène (radicaux hydroxyles, oxygène singulet) (Sharmila et Pardha, 2002).

L'accumulation de la proline dans les plantes a été identifiée par la tolérance des plantes au stress (Khan et al., 2015). Selon Verma (1999), l'accumulation de proline chez les espèces végétales

stressées aux ions métalliques est associée à la réduction des dommages aux membranes et aux protéines.

Dans le présent travail, le résultat montre une accumulation significative de la proline entre les différents traitements en Cd surtout dans la partie aérienne du végétal. Cette accumulation est en corrélation positive avec l'augmentation de la concentration en CdCl<sub>2</sub> dans le milieu.

Ce résultat est confirmé par l'étude d'Aoun (2009), qui a signalé que l'exposition des plants de moutarde indienne (*Brassica juncea*) au CdCl<sub>2</sub> (75 µM) induit une accumulation significative de proline dans les feuilles dont la teneur est multipliée par 3 par rapport au témoin.

Chez des plantules d'*Atriplex halimus*, exposées au CdCl<sub>2</sub> (50 µM) pendant 12 jours, le dosage de la proline des feuilles a montré une augmentation de sa teneur de 50 % par rapport au témoin (Lefèvre et al., 2009).

L'étude de Ben Hassine et al. (2008), a montré qu'en présence de cadmium dans le milieu, il a été enregistré une faible accumulation de proline et de sucres solubles totaux dès le début du traitement. Toutefois, les teneurs accumulées deviennent de plus en plus significatives à fortes concentrations de cadmium dans le milieu. La présence de proline chez les plantes stressées par le cadmium est donc un signe de résistance et non pas de dommages. En effet, il a été démontré que chez *A. halimus*, la proline joue un rôle essentiel dans l'ajustement osmotique notamment dans les premières heures de stress

Les résultats de Nedjimi et Daoud (2009b), sont conformes à ceux qu'on a trouvés. Ils ont montré que la teneur en proline chez des plantules d'*A. halimus* subsp. *schweinfurthii*, soumises au traitement en Cd pendant 15 jours, a été augmentée avec l'augmentation de la concentration en CdCl<sub>2</sub> dans la solution nutritive.

Le Cd est un polluant environnemental extrêmement toxique pour les plantes et les autres organismes vivants dont l'homme. L'accumulation de Cd dans les jeunes plantes d'*A. nummularia* est corrélée avec l'augmentation de sa concentration dans la solution nutritive. Les résultats obtenus dans le présent travail montre que cette accumulation reste maintenue à des valeurs beaucoup plus élevées dans les parties aériennes que dans les racines, et ceci pour toutes les concentrations utilisées.

Cette accumulation a dépassée pour la concentration 400µM (dans la partie aérienne) la quantité de 100 µg/g, ceci montre que *A. nummularia* possède le comportement d'une espèce hyperaccumulatrice.

Ces résultats sont en accord avec d'autres travaux notamment ceux obtenus par Ben Ghnaya et al. (2009), qui ont montré que la quantité du Cd et du Zn accumulée est supérieure dans les parties aériennes que dans les racines chez deux cultivars de *Brassica napus*.

Egalement, Liu et al. (2009), ont rapporté qu'après 21 jours d'exposition à différents traitements en Cd, des plantes de *Lonicera japonica* montrent une augmentation de la concentration de ce métal dans leurs différents organes. Cette augmentation est significative avec l'augmentation de la concentration de ce métal dans le milieu. Ils ont aussi observé que ces plantes sont capables de tolérer et de stocker une quantité importante du Cd dans leurs parties aériennes.

Des résultats similaires ont été observés chez des plantules de *Thlaspi caerulescens*, cultivées sur un milieu nutritif de Haogland et exposées à différentes concentrations en Cd allant de 5 à 500  $\mu\text{M}$ . Il a été trouvé que la majeure partie de Cd absorbée par les plantes se trouve accumulée dans la partie aérienne (65–74% de la quantité totale du Cd absorbée) (Wójcik et al., 2005)

Ce résultat est aussi confirmé par Maaroufi Dguimi et al. (2009), qui ont observé que le Cd est essentiellement accumulé dans les feuilles chez des plantes de tabac (*Nicotiana tabaccum*). Sous un traitement 100 $\mu\text{M}$  CdCl<sub>2</sub>, cette accumulation est supérieure 5 fois dans les feuilles que dans les racines.

Wei et al. (2009), en étudiant *Kalimeris integrifolia*, sous l'effet du cadmium, ont trouvé qu'avec toutes les concentrations en Cd testées, l'accumulation de cet élément dans la partie aérienne est supérieure à celle dans les racines.

Chez *Bidens pilosa*, l'accumulation de Cd dans toutes les parties de la plante augmente avec l'augmentation de la concentration du Cd dans le sol. De même, il a été observé qu'il existe une corrélation linéaire positive entre l'accumulation du Cd dans la partie aérienne et sa concentration dans le sol, cette accumulation présente 97.1% et 97.6% (à deux stades de développement la floraison et la maturation) de la quantité du Cd absorbée par la plante entière (Sun et al., 2009).

Nos résultats se trouvent en opposition avec beaucoup d'autres travaux qui ont indiqué que la majeure partie des métaux lourds absorbée se trouve accumulée au niveau des racines.

Cette hypothèse a été confirmée par Nedjimi et Daoud (2009b), qui ont observé que chez *A.halimus*, le contenu en Cd dans les parties aériennes et racinaires augmente significativement avec l'augmentation de sa concentration dans la solution nutritive. Son accumulation est toujours plus élevée dans les racines que dans les feuilles, environ 75% (618.23  $\mu\text{g/g}$  MS) du Cd absorbé

s'accumule dans les racines. En revanche la proportion exportée vers la partie aérienne reste faible et ne dépasse guère 25% (209.51 µg/g MS) (Nedjimi, 2009).

Des résultats similaires ont été obtenus chez *Potentilla griffithii* (Hu et al., 2009) ; *Populus deltoids*×*Populus nigra* (Wu et al., 2010) ; *Sesuvium portulacastrum* (Mnasri et al., 2015) ; *Trifolium alexandrinum* (Hazrat et al., 2012) ; *Arachis hypogaea* L. (Zhang et al., 2013) ; *Pfaffia glomerata* (Gomes et al., 2013 ; skrebsky et al., 2008 ) ; *Mentha spicata* (Seyedsadr et al., 2013).

Selon Hazrat et al. (2013), l'efficacité de la phytoextraction (hyperaccumulation) peut être valorisée par le calcul du coefficient de bioaccumulation (BAC) et du facteur de translocation (TF).

Zayed et al. (1998), ont mentionné que le coefficient de bioaccumulation (BAC) est le meilleur indicateur pour identifier une plante comme une hyperaccumulatrice, à raison qu'il prend en compte la concentration du métal dans la solution.

Jamil et al. (2009), ont montré que si le TF est supérieur à 1 cela indique qu'il y'a une translocation du métal des racines vers la partie aérienne. De plus, Yoon et al. (2006), ont rapporté que seules les espèces végétales à la fois avec BAC et TF supérieur à 1, possèdent le potentiel d'être considérées comme hyperaccumulatrices.

Nos résultats montrent que sous tous les traitements de CdCl<sub>2</sub>, les plantules d'*A. nummularia* présentent un TF supérieur à 1, ce qui explique que la majeure partie du Cd absorbée est accumulée dans la partie aérienne. Par contre, les valeurs du BAC enregistrées sont inférieures à 1, ce qui suggère que *A. nummularia* est considérée comme un accumulateur de Cd et non pas un hyperaccumulateur.

L'accumulation et la distribution de certains éléments nutritifs dans les tissus de la plante dépendent de l'intensité du stress et de la nature de l'organe contaminé (Zoghlami et al., 2006).

Nos résultats montrent que le cadmium induit une réduction des teneurs en fer, en calcium et en potassium, perceptible dès la plus faible dose du polluant (100µM), cette réduction d'accumulation des éléments essentiels au niveau des parties aériennes et racinaires s'accroît avec la dose de cadmium appliquée.

Ces résultats se trouvent en accord avec ceux obtenus par Nedjimi (2009). Il a observé que la présence du Cd, entraîne une diminution importante des teneurs en calcium, aussi bien dans les organes aériens que racinaires. Cette diminution des teneurs en calcium atteint 66 et 65% par rapport au témoin, respectivement dans la partie aérienne et racinaire. En outre, le cadmium restreint le prélèvement de certains oligoéléments, comme le fer. La baisse des teneurs en fer, décelée dans les

différents organes des plantes traitées par 400  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2$ , peut atteindre 54 et 68% par rapport au témoin, respectivement, dans les organes aériens et racinaires.

Chez des plantules de *Sesuvium portulacastrum* et *Mesembryanthemum crystallinum*, la présence du Cd dans le milieu de culture, provoque une réduction de l'absorption des deux éléments essentiels ( $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ ) (Ghnaya et al., 2007a).

Lefèvre et al. (2009), ont de même montré que l'accumulation du Cd est accompagnée d'une diminution de la concentration de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Fe}^{2+}$  dans les feuilles des plantules d'*A. halimus*.

Egalement les résultats de Bankaji et al. (2015) montrent que le Cd (400 $\mu\text{M}$   $\text{CdSO}_4$ ) modifie les concentrations de plusieurs macroéléments chez les plantes. Ils ont montré que la concentration du potassium  $\text{K}^+$  dans les feuilles des plantules de *Suaeda fruticosa* diminue de 10016 à 8411  $\mu\text{g/g}$  MF.

Selon Asp et al. (1994), ces résultats suggèrent que le Cd affecte directement l'absorption du  $\text{K}^+$ , ce qui réduit son transport vers la partie aérienne ou indirectement en complexant l'ATP et en réduisant la disponibilité de l'énergie, car il n'y a pas de similitude chimique entre les deux éléments.

D'après Sandalio et al. (2001), le Cd peut inhiber la translocation du  $\text{Fe}^{2+}$  dans la partie aérienne de la plante par différents mécanismes, tels que le mouvement radial de  $\text{Fe}^{2+}$  dans les racines, le chargement du  $\text{Fe}^{2+}$  dans les vaisseaux du xylème, ou de son absorption par les pousses.

Pour Dong et al. (2006), il est bien connu que de nombreux effets toxiques de  $\text{Cd}^{2+}$  résultent de son antagonisme avec les éléments essentiels, notamment celles de la même valence, tel que  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  et  $\text{Zn}^{2+}$ .

En présence de cadmium, la baisse des teneurs en éléments essentiels peut être expliquée par :

- Une perturbation de la perméabilité membranaire suite à une altération de leur composition lipidique (Nouairi et al., 2006);
- Une compétition ionique au niveau des sites d'absorption (Ouariti et al., 1997 ; Dong et al., 2006);
- et/ou une plus forte affinité du polluant vis-à-vis de certains composés organiques, qui assurent à travers la sève xylémique et phloémique le transport des éléments, ce qui restreint leur recirculation (Pich et Scholz, 1996).