

3.1 Effets des eaux usées traitées sur la teneur en eau du l'haricot vert et de la tomate

Pour l'haricot vert, nous pouvons constater que seulement au cours de la production que les parties aériennes des plantes irriguées avec les eaux usées traitées présentent une hydratation supérieure à celle du témoin (Tableau 3). Pour la tomate, nous pouvons noter que la teneur en eau des racines et des parties aériennes (feuilles et tiges) dans le traitement E3 est sensiblement la même que celle du témoin. Cependant, nous remarquons que les fruits prélevés sur le traitement eaux usées (E3) sont moins hydratés que ceux du témoin notamment à la production.

Tableau IV-74 : Teneur en eau des différents parties du l'haricot vert (HV) et de la tomate (Ti) exprimé en gg⁻¹ MS

	Haricot vert			tomate		
	P.A	R	Fr	P.A	R	Fr
E0	2.1	2.3	1.5	2.3	1.1	6.2
E1	3.1	3.9	2.0	3.5	3.9	3.5
E2	2.9	2.4	2.4	2.5	3.1	4.0
E3	2.2	3.2	1.2	2.2	1.1	5.1

PA: partie aérienne ; Eo: eau de nappe ; R : racines ; E3: eau usée ; Fr: fruit

3.2. Evaluation des exportations en azote, phosphore et potassium

Nous avons évalué les exportations effectives de N, P et K par les 02 cultures ou les quantités en éléments absorbées par les parties végétales. Les résultats rendements sont dans le Tableau 4 (Charfi.D. 1995.)

Tableau IV-75 : Rendement de l'haricot vert (HV) et de la tomate industrielle ; (TI) en (t/ha)

	Haricot vert				tomate			
	E ₀	E1	E2	E ₃	E ₀	E1	E2	E ₃
MV	12.2	13.4	10.0	3.8	15.5	12.0	11.5	11.8
MS	3.1	0.8	0.2	3.8	0.8	0.08	0.05	1.00

E₀ :eau témoin MV : matière verte- E1 : eau usée brute -E2 : 50% de mélange- E₃ : eau usée traité - MS : matière sèche .

On note qu'en présence d'eau usée, le haricot vert exporte des quantités de N, P et K supérieurs à celles du traitement E₀, eau de nappe (Tableau IV-75). Pour la tomate, la différence de prélèvements des éléments fertilisants entre traitements E₀ et E₃ est faible, malgré un apport en N, P et K plus important par les eaux usées. Connaissant les quantités de N, P et K apportées par les eaux usées traitées et les eaux de nappe pour les deux cultures, ainsi que celles apportées par la fertilisation complémentaire, nous avons essayé de déterminer l'efficacité d'exportation selon Godin (1983) :

$$E_{ex} = \frac{\text{Quantité de N, P ou K exportée}}{\text{Quantité de N, P ou K apportée}}$$

Les résultats obtenus, exprimés en kg exportée/kg apporté, sont indiqués dans le **tableau 6**.

Tableau IV-76 : Efficacité d'exportation de N, P et K par haricot vert et la tomate

	Haricot vert		Tomate	
	E0	E3	E0	E3
N	0.20	0.31	0.19	0.19
P	0.17	0.17	0.10	0.8
K	0.67	0.34	0.37	0.17

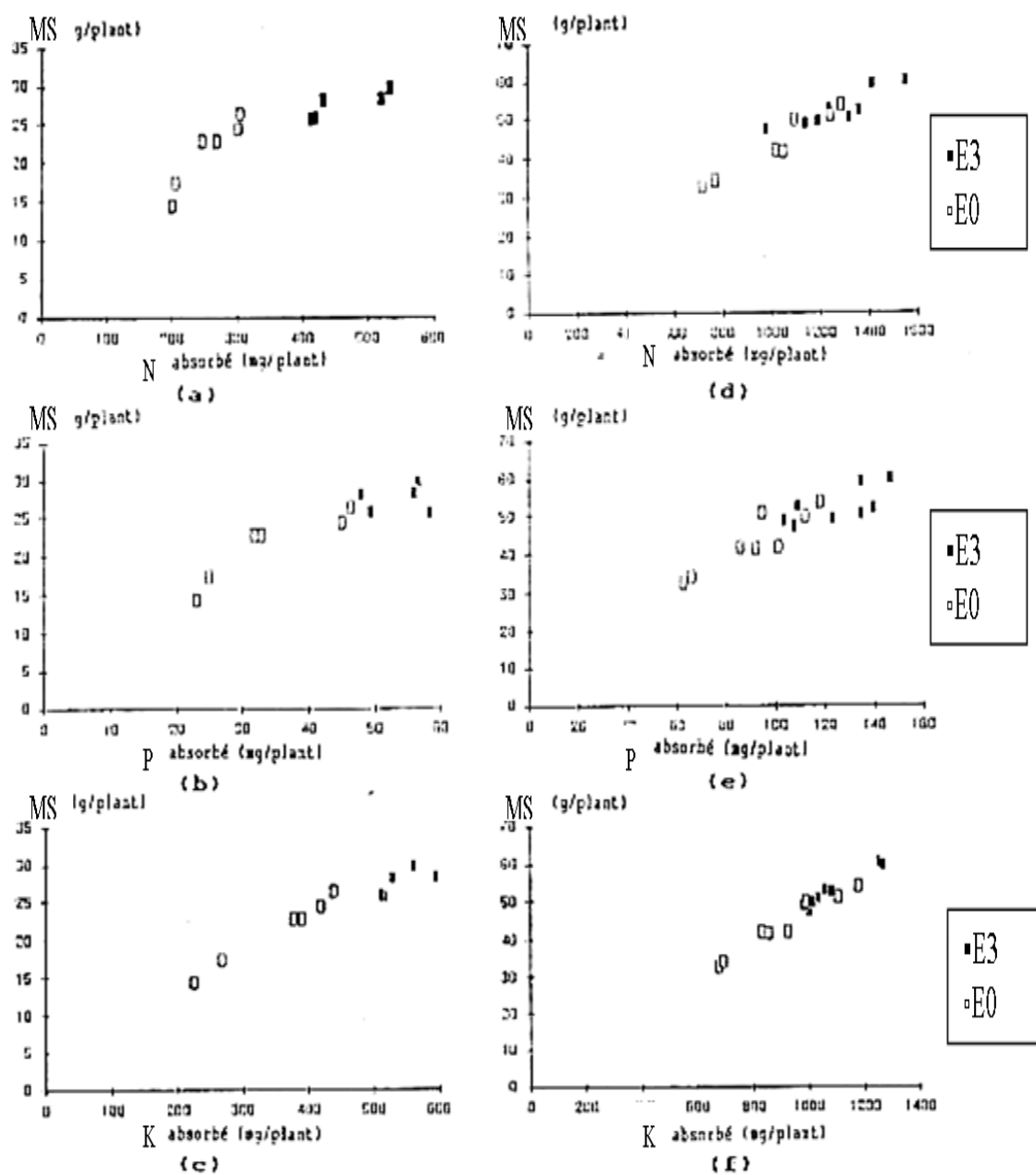
E3 : eau traité E0:eau de nappe

Nous pouvons noter que pour le haricot vert, la quantité d'azote exportée dans le traitement E3 est le double de la quantité exportée dans le traitement E0(**tableau IV-77**) alors que la différence entre les quantités d'azote apporté dans les deux traitements (E_0 et E_3) n'est pas aussi grande; ainsi, l'efficacité d'exportation est plus élevée pour les eaux usées (**tableau IV-78**).

Pour l'haricot vert comme pour la tomate, les quantités de phosphore exportées par unité de phosphore apportée sont équivalentes pour les deux traitements E_0 et E_3 (**tableau IV-78**).

La comparaison entre les traitements E_0 et E_3 montre que bien que la quantité de potassium apportée par les eaux usées soit supérieure à celle apportée par les eaux de nappe (**tableau 1**), la différence entre les quantités de potassium exportées dans les deux traitements (**tableau IV-77**) est faible notamment pour la culture maraîchère, ceci correspond à une efficacité d'exportation moindre dans le cas du traitement eau usée pour les deux cultures étudiées (**tableau IV-78**).

La comparaison entre les deux espèces étudiées montre des efficacités d'exportation en N, P et K plus élevées pour l'haricot vert notamment en présence d'eau usée.



Haricot vert

Tomate industrielle

Figure IV-27: Relation matière sèche produite - azote, phosphore et potassium absorbé pour l'haricot vert (a, b et c) et pour la tomate (d, e et f)

Tableau IV-77 : Quantités de N,P et K exportées par l'haricot vert (HV) et la tomate (TI) (exprimées en kg/ha).

	Haricot vert				Tomate Industrielle				pouvons noter que
	E ₀	E ₁	E ₂	E ₃	E ₀	E ₁	E ₂	E ₃	
N	49.2	120	60.0	99.2	40.6	90.0	66.0	52.8	
P	6.6	10.5	5.5	11.3	3.8	5.2	4.1	5.1	
K	70.4	90.5	80.0	114.8	36.9	66.9	50.0	47.5	

pour le haricot vert, la quantité d'azote exportée dans le traitement E₃ est le double de la quantité exportée dans le traitement E₀ (Tableau 5) alors que la différence entre les quantités d'azote apporté dans les deux traitements (E₀ et E₃) n'est pas aussi différente; ainsi, l'efficacité d'exportation est plus élevée pour les eaux usées (Tableau 6).

Pour l'haricot vert comme pour la tomate, les quantités de phosphore exportées par unité de phosphore apporté sont équivalentes pour les deux traitements E₀ et E₃. La comparaison entre les traitements E₀ et E₃ montre que bien que la quantité de potassium apportée par les eaux usées soit supérieure à celle apportée par les eaux de nappe, la différence entre les quantités de potassium exportées dans les deux traitements est faible ; ceci correspond à une efficacité d'exportation moindre dans le cas du traitement eau usée pour les deux cultures étudiées. La comparaison entre les deux espèces étudiées montre des efficacités d'exportation en N, P et K plus élevées pour l'haricot vert notamment en présence d'eau usée.

Tableau IV-78 : Efficacité d'exportation de N, P et K par haricot vert et la tomate

	Haricot vert				Tomate			
	E ₀	E ₁	E ₂	E ₃	E ₀	E ₁	E ₂	E ₃
N	0.20	2.2	1.2	0.31	0.19	3.3	2.0	0.19
P	0.17	2.9	1.3	0.17	0.10	3.5	1.7	0.8
K	0.67	3.1	1.5	0.34	0.37	3.7	1.9	0.17

E₃ : eau traité E₀:eau de nappe

L'efficacité d'utilisation de N, P et K (E_u) est évaluée par la masse de matière sèche produite par lg d'élément absorbé (Glass 1999 ; Anderson 1985) :

$$E_u = \frac{\text{Matière sèche produite (g/plante)}}{\text{Quantité absorbée (g/plante)}}$$

Une autre approche a été adoptée par Soltani (1988) qui a utilisé la notion de coût de la croissance en un élément donné. Cette notion n'est autre que l'inverse du rapport défini ci-dessus. Cette peut être considérée comme constante dans notre cas (pour chaque zone/ et l'interprétation doit se faire en se référant au modèle théorique. On peut donc ainsi comparer directement les efficacités

Concernant le l'haricot vert, on note que les eaux de nappe permettent une meilleure utilisation de N, P et K que les eaux usées (Tableau 7). En effet, les efficacités d'utilisation de ces éléments dans le traitement E₃ sont nettement inférieures à celles observées dans le traitement E₀. Cette efficacité moindre dans le traitement E₃ est à associer aux fortes doses de N, P ou K absorbées (consommation de luxe). Le l'haricot vert irrigué avec les eaux usées a absorbés des quantités en N, P et K double de celle du témoin pour une augmentation de matière sèche peu importante. Ainsi, l'augmentation de matière sèche observée en présence d'eau usée est inférieure à l'augmentation escompté si l'efficacité de N, P et K absorbé a été la même que celle du traitement E₀.

Tableau IV-79 : Efficacité d'utilisation de N, P et K pour (HV) haricot vert et la tomate industrielle (Ti).

	Haricot vert				Tomate industrielle			
	E0	E1	E2	E3	E0	E1	E2	E3
N	83.6	120	60	60.2	42.4	90	45	41.5
P	637.8	900	300	506.7	476.3	500	200	433.9
K	60.9	140	70	50.8	47.9	100	80	48.5

Les efficacités d'utilisation de N, P et K par la tomate industrielle sont les mêmes pour les deux traitements E₀ et E₃. La comparaison entre les deux espèces, montre que le haricot vert valorise mieux l'azote, le phosphore et le potassium absorbés que la tomate industrielle.

3.3. Effet de la charge saline des eaux usées sur la composition chimique

Si on se rapporte aux résultats d'analyse des eaux utilisées dans notre expérimentation, on constate que par rapport à l'eau de nappe, l'eau usée apporte une quantité supérieure en Na et SO₄, une quantité équivalente en Mg et Cl et une quantité moindre en Ca. On se propose d'exposer les effets des eaux usées sur la composition en Ca, Mg, Na, Cl et S des différentes parties de l'haricot vert et de la tomate.

3.3.1. Teneurs en calcium et magnésium

Les concentrations moyennes en Ca et Mg de l'eau de nappe sont respectivement de 250 et 50mg/l, celles des eaux usées traitées sont respectivement de 150 et 56mg/l. L'analyse minérale de la plante montre que, pour le haricot vert comme pour la tomate, l'irrigation avec les eaux usées n'a pas d'effet significatif sur les teneurs en Ca et Mg au niveau des différentes parties de la plante (Tableau 8).

Tableau IV-80 : Effet des eaux usées sur les teneurs en Ca et Mg dans les différentes parties de l'haricot vert (HV) et de la tomate (% MS).

		Haricot vert				Tomate industrielle			
		F	T	R	FR	F	T	R	FR
Ca	E0	0.73	0.37	1.9	0.26	1.9	0.22	0.05	0.20
	E1	1.1	2.1	3.1	2.2	2.2	2.3	3.4	3
	E2	0.60	1.0	1.5	1.1	1.1	1.2	1.7	1.5
	E3	0.62	0.32	1.3	0.20	1.6	0.35	0.03	0.17
Mg	E0	0.47	0.43	0.31	0.22	0.82	0.62	0.14	0.21
	E1	2.2	2.1	3.0	2.0	1.9	1.8	3.2	2.9
	E2	1.1	1.0	1.5	1.0	0.8	0.6	1.6	1.3
	E3	0.44	0.48	0.23	0.23	0.83	0.72	0.15	0.23

F : feuille; Fr : fruit ; E0 : eau témoin potable; E3 : eau usée traitée ; R : Racine

3.3.2. Teneur en sodium

Les eaux usées sont plus chargées en Na (366 mg/l= 15,9 meq/l) que les eaux de nappe (214 mg/l= 9,3 meq/l) mais dans les deux cas les concentrations en Na sont faibles. La comparaison des figures 2 présentant les teneurs en sodium des différentes parties du (HV) et de la tomate (T) en fonction des traitements, met en évidence une accumulation de Na surtout dans les tiges de la tomate irriguée à l'eau usée les valeurs sont d'environ 5 fois celle du témoin (Figure 4). L'enrichissement en Na a également intéressé de manière très significative le fruit de la tomate et les racines des deux espèces. On note aussi que les teneurs en sodium les plus élevées se trouvent dans les racines et tiges de la tomate et les feuilles et les fruits sont les organes les moins chargés. Pour le haricot vert, le sodium est retenu dans les racines.

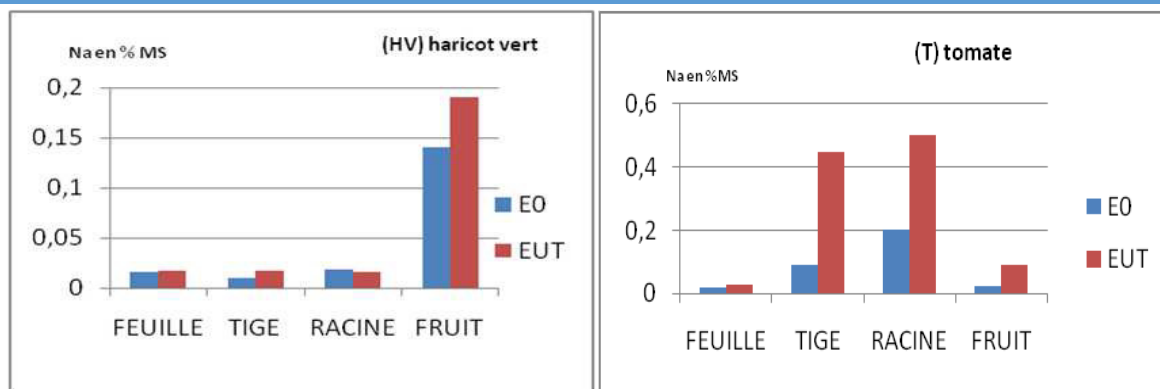


Figure IV-28. Effet des eaux usées sur la teneur en sodium dans les différentes parties du (HV) et de la tomate (T). (% MS)

3.3.3. Teneurs en soufre

Les eaux usées contiennent des quantités importantes de sulfates : les concentrations sont en moyennes de 350 mg/l et peuvent atteindre 950 mg/l alors que dans les eaux de nappe, les concentrations sont de l'ordre de 90 mg/l. L'analyse des différentes parties du haricot vert montre que l'eau usée traitée augmente les quantités de S dans les feuilles et tiges surtout au niveau de la dernière phase (Figure 5). Indépendamment des traitements, on remarque également que le soufre a tendance à se concentrer au niveau des racines.

Concernant la tomate, les teneurs en soufre des différentes parties de la plante ne présentent aucune différence entre les traitements E_0 et E_3 . Comme pour le haricot vert, on peut noter que le soufre est retenu dans les racines et que les fruits présentent les concentrations les plus faibles. Ainsi la concentration élevée des eaux usées en sulfates par rapport à l'eau de nappe ne se reflète sur la composition de la plante qu'à un faible degré et seulement pour le haricot vert.

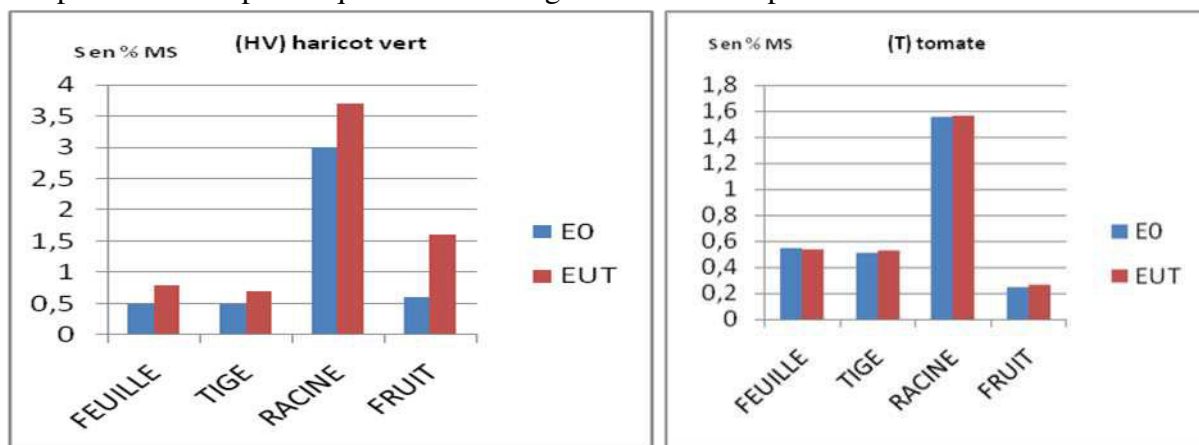


Figure IV-29. Effet des eaux usées sur la teneur en soufre dans les différentes parties du (HV) (a) et de la tomate (b) (% MS)

3.3.4. Teneur en bore

Les concentrations moyennes en bore des eaux usées traitées sont de l'ordre de 1 mg/l. Ayoub (1978) a trouvé des résultats comparables. Les eaux usées augmentent de façon significative les teneurs en bore dans les différentes parties du haricot vert (Figure 6) et dans les feuilles de la tomate sans toutefois provoquer des modifications dans le fruit (Figure 6).

Le bore migre vers les parties aériennes des deux espèces et se concentre dans les feuilles. Les fruits sont moyennement chargés en cet élément.

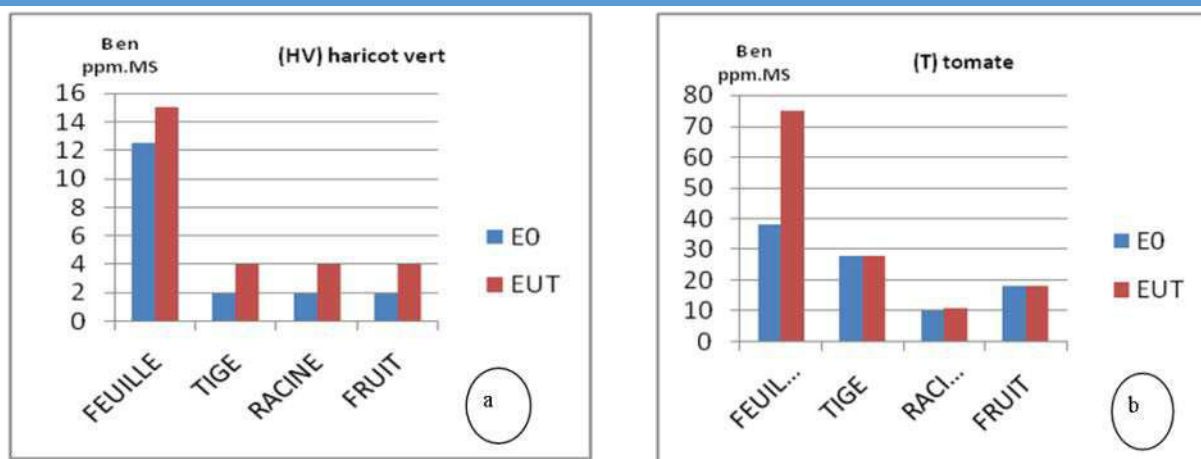


Figure IV-30. Effet des eaux usées sur la teneur en bore dans les différentes parties du haricot vert (a) et de la tomate (b) (ppm.MS).

3.3.5. Teneur en cuivre

Les teneurs en cuivre dans les différentes parties du haricot vert et de la tomate ne sont pas modifiées par l'apport d'eaux usées traitées (Tableau ç). En effet, les différences entre traitements eau usée (E_3) et eau de nappe (E_0) sont insignifiantes. La différence assez faible entre les concentrations en Cu des eaux usées et des eaux de nappe explique ce résultat. Le même résultat est observé avec des teneurs en Cu ayant le même ordre de grandeur.

TableauIV-81. Effet des eaux usées sur les teneurs en cuivre dans les différentes parties du haricot vert et de la tomate (ppm.MS).

	Haricot vert				Tomate industrielle			
	F	T	R	Fr	F	T	R	Fr
E0	1.8	1.2	1.5	0.4	1.0	2.9	2.0	2.5
E1	3.60	3.4	3	1.8	4.0	5.8	4.0	5.0
E2	2.5	2.4	2.0	1.0	2.0	3.5	2.6	3.0
E3	2.3	2.0	2.3	1.9	1.5	3.0	3.4	2.2

E_0 :eau de nappe ; E_3 :eau usée traité ; F :feuille ; T :tige ; R :racine ; Fr :fruit

3.3.6. Teneur en zinc

Les eaux usées traitées apportent une quantité en Zn (0,72Kg/ha pour 600mm d'eau) supérieure à celle apportée par les eaux de nappe (0,24 Kg/ha pour 600mm d'eau). La Figure 5 présentant les variations des teneurs en Zn dans les différentes parties du haricot vert et de la tomate indiquant une augmentation significative de ces teneurs en présence d'eau usée dans les feuilles et racines.

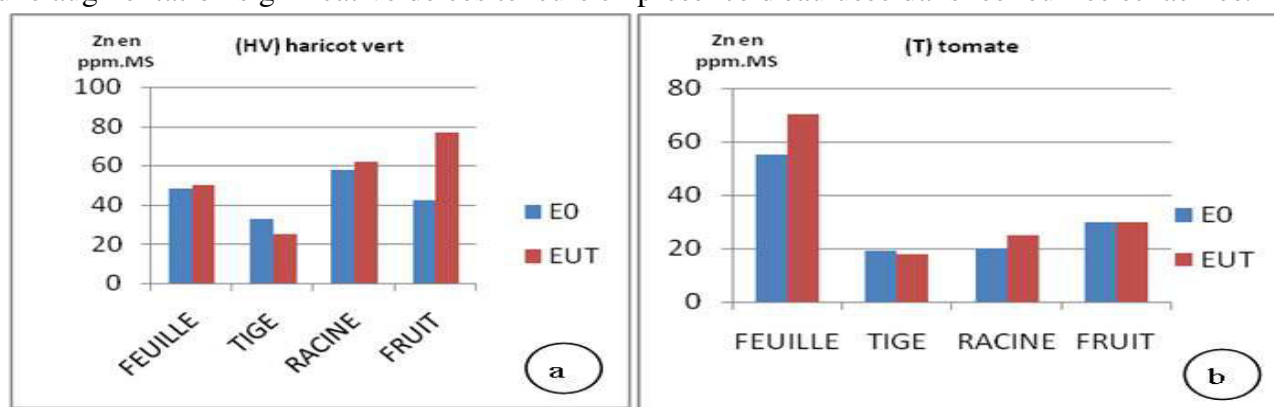


Figure IV-31 : Effet des eaux usées sur la teneur en zinc dans les différentes parties (HV) (a) et de la tomate (b). (ppm.MS)

3.3.7. Teneurs en cadmium et plomb

Le cadmium n'est présent dans les eaux usées qu'à l'état de traces. Quand au plomb, l'apport par les eaux usées est en moyenne de 1,14 Kg/ha pour 600 mm d'eau. Il n'y a pas de différence significative due à l'apport d'eau usée traitée au niveau des deux cultures (Tableau 10).

Tableau IV-82 : Effet des eaux usées sur les teneurs en cadmium et Plomb dans les différentes parties du haricot vert et de la tomate (ppm MS).

		Haricot vert				Tomate industrielle			
		F	T	R	Fr	F	T	R	Fr
Cd	E0	0.10	0.75	0.00	0.1	0.00	0.00	0.76	0.26
	E1	1.2	1.3	2.5	2.5	0.90	1.00	1.9	0.90
	E2	0.15	0.52	0.39	0.17	0.12	0.025	0.74	0.27
	E3	0.20	0.30	0.79	0.25	0.25	0.05	0.72	0.28
Pb	E0	0.30	0.75	0.17	0.76	1.16	1.8	1.50	0.90
	E1	1.2	1.3	3.0	2.6	1.5	1.9	2.5	2.2
	E2	1.15	0.82	1.19	1.33	1.83	1.93	2.05	0.94
	E3	2.00	0.90	2.22	1.90	2.50	2.06	2.6	0.98

E₀: eau de nappe ; E₃: eau usée traitée ; F : feuille ; T : tige ; R : racine ; Fr : fruit

L'irrigation avec les eaux usées traitées a entraîné des modifications dans la composition chimique du végétal. Cette modification est variable en fonction de l'espèce considérée, de l'organe, de la nature et la concentration des éléments contenus dans les eaux usées traitées. La richesse de ces eaux en éléments nutritifs affecte de manière significative la composition en N, P et K du haricot vert. Les teneurs se sont accrues dans les différentes parties de la plante ; pour la tomate industrielle, aucun effet n'a été enregistré. D'autre part, nous avons pu noter que par rapport à la tomate ind, le haricot vert permet une meilleure exportation de N, P et K et présente des efficacités d'utilisation de ces éléments (N, P et K) supérieures. Ainsi, le haricot vert valorise mieux les matières fertilisantes apportées par les eaux usées. Cependant, la comparaison entre traitements E₀ et E₃ montre que pour la tomate, les mêmes quantités de N, P et K sont utilisées pour la production de 1 g de matière sèche quelle que soit la qualité d'eau. Pour le haricot vert, les eaux usées permettent un meilleur rendement mais les efficacités d'utilisation de N, P et K sont inférieures à celles obtenues en présence d'eau de nappe. Des études antérieures ont montré que des cultures fourragères, le bermuda-grass cotier, irrigué avec des eaux usées traitées présentent les meilleurs taux d'exportations de l'azote soit environ 67% et permettent une élimination de 20% du phosphore (Adam-Bradford A., Hoekstra F., van Veenhuizen R. 2009).

La réaction vis à vis des autres éléments majeurs s'est manifestée par une accumulation importante de Na dans les tiges et racines de la tomate irriguées à l'eau usée, au niveau des fruits. Les modifications ont été moins importantes et les teneurs plus faibles. Dans la partie aérienne du haricot vert, le sodium varie peu. Les chlorures s'accumulent dans les différentes parties du haricot vert et de la tomate sans épargner le fruit. Les fruits de la tomate sont peu chargés en soufre et les modifications en fonction des traitements sont négligeables. Bien que le soufre soit retenu au niveau des racines, les parties aériennes du haricot vert ont tendance à l'accumuler en présence d'eau usée.

L'irrigation avec les eaux usées n'a pas entraîné de modifications importantes de la composition en micro-éléments des espèces étudiées. Pour les deux cultures, les teneurs en cadmium et plomb sont comparables dans les deux traitements E₀ et E₃ et sont dans les normes des plantes consommables, soient Cd < 3 ppm et Pb < 10 ppm (Melsted 1999 et Godin 1997). L'application des eaux usées augmente les teneurs en bore, fer et zinc des parties aériennes des deux cultures sans toutefois modifier les teneurs au niveau du fruit. Ces augmentations de B, Fe et Zn observées n'ont nullement affecté le comportement de la plante. Les teneurs enregistrées sont au dessous des seuils

d'alerte pour les plantes consommables, avec B < 150 ppm et Zn < 300 ppm (Melsted 1999). Dans des essais menés en Californie, Richard *et al.* (2009) ont montré que l'irrigation avec des eaux usées traitées ne modifie pas la composition en microéléments des parties consommables d'artichaut et des légumes.

Les feuilles de la tomate accumulent plus de bore, de zinc, de fer, de plomb et surtout de cadmium que les feuilles du haricot vert. Les concentrations de la plupart de ces éléments sont fortement réduites dans le fruit. Enfin, il faut surtout noter que l'apport des eaux usées n'a pas affecté les rendements des cultures. En effet, les rendements, notamment ceux du haricot vert ont augmenté d'une manière significative en présence d'eau usée.