

Analyse des teneurs en éléments trace dans la végétation

des sites de St-Laurent le Minier : bioindicateur d'accumulation foliaire

La méthode retenue pour la mise en œuvre du bioindicateur d'accumulation foliaire consiste à mesurer les teneurs en éléments traces (ET) d'échantillons composites de feuilles, prélevées sur des communautés herbacées représentatives de la végétation des sites étudiés. Une comparaison des valeurs observées avec des valeurs de référence, obtenues sur sites non contaminés, permet d'évaluer l'excès de transfert des ET vers la végétation, ce qui renseigne à la fois sur la phytodisponibilité des contaminants et sur leurs risques de transfert vers les réseaux trophiques.

Les valeurs de référence utilisées pour As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn sont issues du programme ADEME BioIndicateurs II ; pour ces éléments les paramètres de distribution ont été évalués sur une vingtaine de modalités témoin, permettant d'établir deux valeurs guide : 1/ la valeur médiane des concentrations foliaires de la végétation sur sites non contaminés, et 2/ la vibrisse supérieure interne de la distribution, seuil au-delà duquel des anomalies (teneur « inhabituellement » élevées) peuvent être suspectées. A noter que cette approche est tout à fait similaire à celle proposée par Baize (2001) pour définir des valeurs « pour un seuil d'investigation » dans le domaine de la contamination des sols. Par contre pour Hg, Ti et Tl, qui n'ont pas été étudiés dans le programme BioIndicateurs, les valeurs que nous avons utilisées sont celles de la « Plante de Référence », telle que définie par Markert (1992) ; dans ces cas, seules des valeurs moyennes sont disponibles. L'ensemble des valeurs guide retenues est présenté dans le tableau I.

Tab. I : Valeurs guide des teneurs foliaires en éléments traces de la végétation de sites non contaminés.

Descripteur	Elément (mg/kg MS)									
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Ti	Tl	Zn
Médiane ^a	0.45	0.16	0.59	9.1	NA	1.65	0.23	NA	NA	56.9
Moyenne ^b	---	---	---	---	0.1	---	---	5	0.05	---
Vint ^c	1.72	0.67	1.32	17.4	NA	6.12	0.67	NA	NA	105.3

^a d'après Faure et al. (2012)

^b d'après Markert (1992)

^c Vibrisse supérieure interne de la distribution, d'après Faure et al. (2012)

Dans la zone de St Laurent le Minier, six sites ont été échantillonnés (S1 à S6) selon le protocole standard (échantillons composites foliaires de la végétation herbacée). Compte tenu de la profondeur d'enracinement relativement faible de la plupart des espèces herbacées (généralement inférieure à 1 m), ce protocole standard permet de détecter des anomalies superficielles de mobilité des ET pouvant témoigner d'une contamination anthropique. A l'inverse, on peut faire l'hypothèse que les arbres et arbustes ligneux, qui présentent un enracinement allant de quelques m à quelques dizaines de m, renseignent sur le comportement en profondeur des ET. En tout état de cause, on peut donc s'attendre à ce que les concentrations foliaires en ET soient différentes dans la végétation herbacée et dans la végétation ligneuse. Pour tester cette hypothèse nous avons réalisé un échantillonnage supplémentaire sur le site S4, en préparant des échantillons composites foliaires prélevés uniquement sur des espèces ligneuses. Ces résultats seront présentés séparément.

I/ Teneurs foliaires élémentaires de la végétation herbacée des sites.

Les teneurs foliaires en ET de la végétation des six sites d'étude sont présentées dans la figure 1.

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en Cr, Cu, Hg, Ni et Ti sont tout à fait comparables, voire inférieures, à celles d'une végétation de milieux non contaminés. Le transfert de ces éléments vers les plantes ne présente donc aucun risque particulier sur les six sites étudiés. Par contre en ce qui concerne As, Cd, Pb, Tl et Zn des anomalies plus ou moins importantes sont observées sur la plupart des sites. La phytodisponibilité de ces éléments, et par conséquent leur transfert potentiel vers les réseaux trophiques, peut donc être considérée comme « inhabituellement » élevée sur ces sites.

Manifestement, les deux sites les plus contaminés sont S1 et S5 ; globalement sur ces sites les concentrations en As, Cd, Pb, Tl et Zn dans la végétation sont respectivement 4X, 200X, 1000X, 8000X et 30X supérieures aux teneurs habituellement mesurées en sites non contaminés. A l'inverse le site le moins contaminé est S6 où seule une légère anomalie des teneurs foliaires en Pb (environ 4X la teneur habituelle) est détectée. Les autres sites (S2, S3 et S4-H) ne présentent aucune anomalie pour l'As et montrent des contaminations intermédiaires pour les autres éléments ; globalement, les teneurs foliaires mesurées pour Cd, Pb, Tl et Zn sont respectivement 20X, 30X, 20X et 5X supérieures aux teneurs habituelles.

II/ Comparaison espèces herbacées/espèces ligneuses :

La comparaison espèces herbacées/espèces ligneuses a été réalisée afin d'évaluer l'influence de la profondeur d'enracinement sur les teneurs foliaires élémentaires de la végétation. La comparaison a été réalisée sur le site S4, les résultats sont présentés dans le tableau II.

Tab. II : teneurs en éléments trace (mg/kg MS) dans des échantillons foliaires composites d'espèces ligneuses et herbacées, prélevées sur un même site. Les *p*-value inférieures à 0.05 (en rouge) indiquent une différence significative.

Elément	Espèces		<i>p</i> -value (Wilcoxon)
	Ligneuses	Herbacées	
As	<0.1	0.39	0.02
Cd	0.18	1.8	0.008
Cr	0.45	0.49	0.34
Cu	3.3	6.0	0.17
Hg	0.03	0.04	0.92
Ni	0.37	0.52	1
Pb	1.7	5.0	0.01
Tl	1.3	5.4	0.31
Tl	0.33	1.7	0.15
Zn	48	260	0.008

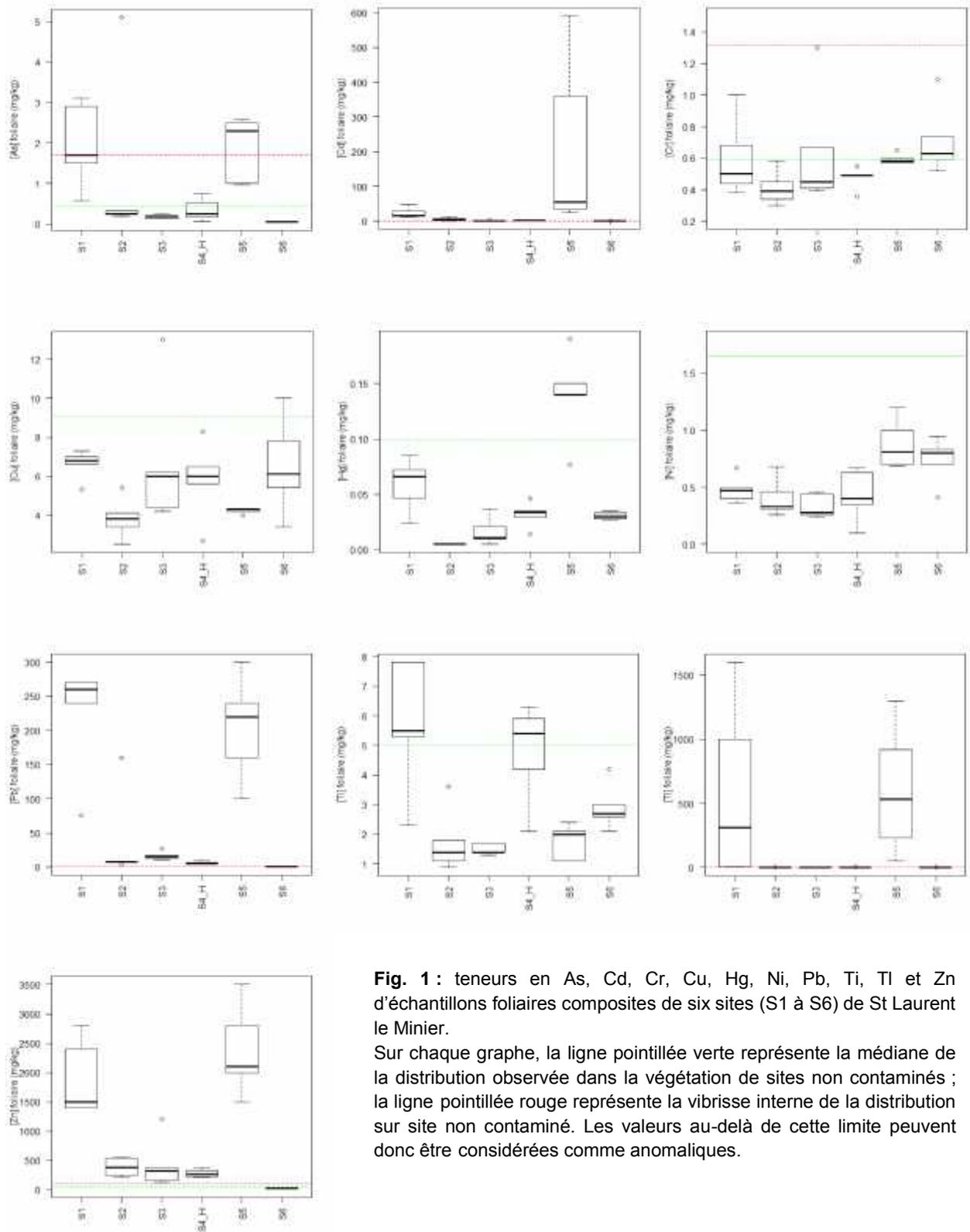


Fig. 1 : teneurs en As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Ti, Tl et Zn d'échantillons foliaires composites de six sites (S1 à S6) de St Laurent le Minier.

Sur chaque graphe, la ligne pointillée verte représente la médiane de la distribution observée dans la végétation de sites non contaminés ; la ligne pointillée rouge représente la vibrisse interne de la distribution sur site non contaminé. Les valeurs au-delà de cette limite peuvent donc être considérées comme anormales.

Les résultats présentés dans le tableau II montrent que les teneurs élémentaires sont globalement supérieures dans les échantillons d'origine herbacée que dans ceux d'origine ligneuse. Cependant, les différences ne sont statistiquement significatives que pour As, Cd, Pb et Zn ; pour les autres éléments le test utilisé (test de Wilcoxon) ne permet pas de conclure à une différence significative.

Il faut noter que parmi ces éléments, le Cd, le Pb et le Zn présentent des teneurs anormalement élevées dans la végétation herbacée de la zone S4 (Fig. 1). Leurs teneurs plus basses, mesurées dans la végétation ligneuse de cette même zone, pourraient donc marquer une atténuation en profondeur de la contamination. De fait, pour le Cd et le Zn, les teneurs foliaires mesurées dans la végétation ligneuse correspondent à celles habituellement observées sur sites non contaminés ; pour le Pb par contre, les teneurs foliaires restent près de 7X supérieures aux valeurs habituelles, ce qui pourrait suggérer une contamination plus profonde ou une anomalie géochimique naturelle.

Ces résultats sont bien sûr encore très préliminaires et mériteraient d'être confirmés et complétés sur des échantillons d'effectifs plus grands et dans différents contextes pédogéochimiques. Si la tendance observée se confirme, une double stratégie d'échantillonnage (communautés herbacées et ligneuses) pourrait être définie pour la mise en œuvre du bioindicateur d'accumulation foliaire, en fonction de la profondeur de sol à prospector. Quoi qu'il en soit, d'un point de vue directement pratique, ces résultats attirent l'attention sur l'importance du choix des communautés végétales étudiées (herbacées vs ligneuses) lors de l'échantillonnage d'un site. Les utilisateurs du bioindicateur d'accumulation foliaire devront donc être vigilants sur ce point.

Dans un autre ordre d'idée il est intéressant de noter une différence dans les concentrations foliaires des principaux contaminants, entre les communautés herbacées et ligneuses. En absence de traitement de la totalité des sites de la zone étudiée, favoriser un reboisement, au détriment d'une végétation herbacée, au moins sur les sites les moins contaminés (S2, S3 et S4), pourrait donc permettre de réduire significativement les transferts vers les plantes, et donc vers les consommateurs primaires.

III/ Classement des sites / Calcul des indices :

Une analyse des données par élément et par site permet de repérer rapidement les principales anomalies mais, compte tenu du nombre de contaminants en présence, elle permet difficilement de positionner les sites les uns par rapport aux autres. Afin de faciliter l'évaluation des risques et de mieux définir les priorités de gestion, il est pourtant important de pouvoir établir un classement des zones étudiées. Dans ce cadre il est possible d'évaluer « l'excès de charge métallique foliaire » de la végétation de chaque site, par comparaison aux teneurs habituelles d'une végétation de sites non contaminés.

L'approche permettant d'évaluer l'excès de charge métallique a été définie dans le cadre du programme BioIndicateurs II. Elle est rappelée brièvement ci-dessous :

1- Calcul de « l'excès de charge par élément » :

$$EC_{\text{Elément}} = (\text{MedObs} - \text{MedT}) * \text{FreqOut} / \text{MedT} \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec :

MedObs = médiane de la distribution observée sur le site étudié, pour l'élément considéré
 MedT = médiane de la distribution témoin pour l'élément considéré
 FreqOut = fréquence des outliers dans la distribution observée, par rapport à la distribution témoin

2- Calcul de la « Charge Élémentaire Totale » de chaque site : Indice CET

$$CET_{\text{Site}} = \sum EC_{\text{Élément}} \quad (\text{Eq. 2})$$

N.B. : Ce calcul ne peut être réalisé que lorsque les paramètres de la distribution témoin (médiane et vibrisse) sont connus. Dans cette étude, le Hg, le Ti et le Tl seront donc exclus de l'évaluation.

L'indice CET renseigne sur « l'excès de charge élémentaire totale » de la végétation d'un site, par rapport à une population statistique témoin. Il permet donc de détecter des anomalies dans la phytodisponibilité globale des éléments, informations très importantes lorsque la question du transfert vers les réseaux trophiques se pose. Cependant, dans le classement des sites qu'il génère, l'indice CET ne tient pas compte de la toxicité différentielle des différents éléments vis-à-vis de cibles biologiques potentielles. Dans ces conditions, les excès de transfert vers la végétation ne renseignent pas réellement sur le risque qu'ils présentent, notamment pour les consommateurs primaires.

Pour affiner l'évaluation, il est possible d'associer au calcul de l'indice CET, le calcul d'un (ou de plusieurs) autre(s) indice(s) tenant compte de la toxicité respective des éléments concernés (indice(s) PhytoMet). Le choix des facteurs de toxicité associés à chaque élément pour le calcul de l'indice PhytoMet est toutefois délicat, dans la mesure où il dépend avant tout des organismes cibles considérés. En première analyse, et dans un souci d'uniformisation avec l'indice MeTox utilisé pour l'évaluation de la qualité des eaux, nous proposons de retenir, pour chaque élément du calcul, les facteurs de toxicités généralement associés à des cibles de type « vertébrés ». Ces facteurs de toxicité sont listés ci-dessous :

$$k_{As} = 10 ; k_{Cd} = 50 ; k_{Cr} = 1 ; k_{Cu} = 5 ; k_{Ni} = 5 ; k_{Pb} = 10 ; k_{Zn} = 1$$

L'indice PhytoMet peut alors être calculé de la façon suivante :

$$PhytoMet_{\text{Site}} = \sum (EC_{\text{Élément}} * k_{\text{Élément}}) \quad (\text{Eq. 3})$$

Les données permettant de calculer les indices CET et PhytoMet de chaque site sont présentées dans les tableaux I (médianes des distributions témoins, MedT) et III (médianes et fréquence des outliers dans les distributions observées, MedObs et FreqOut). Les classements obtenus sont présentés dans le tableau IV.

La comparaison des indices CET des échantillons de St-Laurent le Minier sépare très clairement trois groupes de sites, sur une échelle variant sur trois ordres de grandeur : 1/ les sites S1 et S5, dont la végétation présente des concentrations élémentaires foliaires très fortement anormales (CET ≈ 1300), 2/ les sites S2, S3 et S4, dont la végétation présente des excès significatifs de concentrations foliaires en éléments, mais dont la CET calculée reste inférieure à 100, et 3/ le site S6, qui présente une CET, non nulle mais faible, qui reste très largement inférieure à 10.

Tab. III : Paramètres de distribution observés sur les six sites d'étude, pour les éléments retenus pour le calcul des indices CET et PhytoMet

Elément	Paramètre	Site/échantillon					
		S1	S2	S3	S4-H	S5	S6
As	MedObs	1.7	0.26	0.20	0.39	2.3	<0.1
	FreqOut	0.4	0.2	0	0	0.6	0
Cd	MedObs	15	6.3	0.66	1.8	56	0.06
	FreqOut	1	1	0.4	0.8	1	0
Cr	MedObs	0.50	0.39	0.45	0.49	0.58	0.63
	FreqOut	0	0	0	0	0	0
Cu	MedObs	6.8	3.8	6.0	6.0	4.3	6.1
	FreqOut	0	0	0	0	0	0
Ni	MedObs	0.47	0.33	0.28	0.52	0.81	0.80
	FreqOut	0	0	0	0	0	0
Pb	MedObs	260	7.7	15	5.0	220	0.90
	FreqOut	1	1	1	1	1	1
Zn	MedObs	1500	380	380	260	2100	25
	FreqOut	1	1	0.8	1	1	0

Tab. IV : Indices CET et PhytoMet mesurés sur les six sites d'étude. Les couleurs soulignent les regroupements possibles des zones.

Site	Indice CET	Indice PhytoMet
S1	1254	15974
S2	78	2251
S3	70	709
S4-H	33	622
S5	1351	27049
S6	2	23

Lorsque l'indice PhytoMet est considéré, la séparation des sites est tout aussi nette (échelle PhytoMet ≈ 30 à ≈ 30000) mais un regroupement légèrement différent est obtenu, permettant de séparer assez clairement le site S2 des sites S3 et S4 (Tab. IV). Par contre les sites S1 et S5 d'une part, et S6 d'autre part, restent aux deux extrémités de l'échelle.

Si les indices CET et PhytoMet distinguent très bien entre eux les six sites étudiés à St Laurent Le Minier, il peut être intéressant de resituer les indices calculés par rapport à ceux mesurés pour d'autres situations de terrain. A titre de comparaison, les deux sites les plus contaminés étudiés dans le cadre du programme Bioindicateurs II (sites de Métaeurop et d'Auzon) présentent des indices PhytoMet compris entre 600 et 1000, c'est-à-dire comparables à ceux des sites S3 et S4 de St Laurent Le Minier. Selon ce cadre de comparaison, les sites S1 et S5 présentent des indices exceptionnellement élevés alors que le site S6 présente un très faible excès de risque de transfert. A noter que la légère anomalie en Pb dans la végétation du site S6 pourrait être liée à une anomalie géochimique naturelle ; ce point pourrait être vérifié.

En conclusion les concentrations métalliques foliaires mesurées sur les sites étudiés à St Laurent le Minier permettent de mieux évaluer la phytodisponibilité des contaminants et de mieux appréhender les risques potentiels pour les consommateurs primaires. De toute évidence les sites S1 et S5 sont caractérisés par une phytodisponibilité des ET très anormalement élevée. A coté du risque de lessivage et de dispersion mécanique des contaminants, ces deux sites représentent donc une source de transfert potentielle très

significative pour les consommateurs primaires et les réseaux trophiques. Le site S2 présente un indice PhytoMet près de 10 fois plus faible que les sites 1 et 5, mais qui reste toutefois très important par rapport aux situations habituellement rencontrées. Les sites S3 et S4 présentent un indice PhytoMet trois fois plus faible que le site 2 ; les valeurs mesurées sur ces sites peuvent tout de même être considérées comme inhabituellement élevées, et indiquent un risque potentiel de transfert vers les réseaux trophiques supérieur à une situation « normale ». Le site S6 enfin, bien que présentant un indice PhytoMet supérieur à celui de sites non contaminés, peut être considéré comme la référence locale.